

Las cenizas volcánicas del Popocatepétl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria

Centro Nacional de Prevención de Desastres
Instituto de Geofísica, UNAM



1ª edición, diciembre 2001
Versión Electrónica 2014

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Miguel Ángel Osorio Chong
SECRETARIO DE GOBERNACIÓN

© SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
Abraham González Núm. 48,
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,
C.P. 06699, México, D.F.

Luis Felipe Puente Espinosa
COORDINADOR NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL

© CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
Av. Delfín Madrigal Núm. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D. F.
Teléfonos:
(55) 54 24 61 00
(55) 56 06 98 37
Fax: (55) 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.gob.mx

Dr. Carlos M. Valdés González
DIRECTOR GENERAL DEL
CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

© Autores:

“Historia de la Actividad Reciente del Popocatepetl (1354 -1993)”
Servando de la Cruz Reyna, José Luis Quezada Catalán, Coral Peña López, Oscar Zepeda Ramos y Tomás Sánchez Pérez.

“Resumen de la Actividad del Volcán Popocatepetl de Diciembre 1994 a Mayo 2001”
Carlos Valdés González, Servando de la Cruz Reyna, Alicia Martínez Bringas, Roberto Quaas Weppen y Enrique Guevara Ortíz

“Las Cenizas Volcánicas”
Ana Lillian Martín Del Pozzo y Fabiola Mendiola

“Patrones de Viento en las Cercanías del Volcán Popocatepetl, los Productos Balísticos y sus Efectos”
Hugo Delgado Granados

“Sistema de Monitoreo y Vigilancia del Volcán Popocatepetl”
Roberto Quaas Weppen, Enrique Guevara Ortíz, Servando de la Cruz Reyna, Carlos Valdés González y Gilberto Castellán Zetina

“Análisis de Escenarios Posibles de Formación de Depósitos de Ceniza Volcánica Alrededor del Volcán Popocatepetl, Incluyendo los Sitios Propuestos para Aeropuertos”
Servando De la Cruz Reyna

“Manejo de Cenizas en otros Aeropuertos y Aerovías del Mundo”
Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

Detección y Seguimiento de Nubes de Ceniza.
Enrique Guevara Ortíz, Roberto Quaas Weppen, Carlos Valdés González y Servando de la Cruz Reyna

“Efectos de las Cenizas del Volcán Popocatepetl en la Aeronavegación”
Hugo Delgado Granados

“Algunas Recomendaciones Basadas en experiencias de otros aeropuertos”
Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

Coordinación y compilación: Roberto Quaas Weppen y Sergio M. Alcocer Martínez de Castro

Edición: Oscar Zepeda Ramos
Portada: Susana González Martínez

ISBN: 970-628-612-8

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MÉXICO. PRINTED IN MEXICO

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

CONTENIDO

Resumen Ejecutivo.....	ii
1. Introducción	1
2. Historia de la Actividad Reciente del Popocatepetl (1354-1993)	3
3. Resumen de la Actividad del Volcán Popocatepetl, Diciembre 1994 a Mayo 2001	21
4. Las Cenizas Volcánicas.....	43
5. Patrones de Vento en las Cercanías del Volcán Popocatepetl, los Productos Balísticos y sus Efectos	51
6. Sistema de Monitoreo y Vigilancia del Volcán Popocatepetl	83
7. Análisis de Escenarios Posibles de Formación de Depósitos Ceniza Volcánica alrededor del Volcán Popocatepetl, Incluyendo los Sitios Propuestos para Aeropuertos.....	89
8. Manejo de Cenizas en otros Aeropuertos y Aerovías de Mundo.....	103
9. Detección y Seguimiento de Nubes de Ceniza.....	125
10. Efectos de las Cenizas del Volcán Popocatepetl en la Aeronavegación.....	133
11. Algunas Recomendaciones Basadas en Experiencias de otros Aeropuertos	147
12. Sumario	161

RESUMEN EJECUTIVO

Si bien la actividad reciente del volcán Popocatepetl ha sido de nivel relativamente bajo, debe tenerse presente que siempre existe un potencial de que se desarrolle una erupción magmática de mayor magnitud, aunque con baja probabilidad de ocurrencia. El riesgo que representa debe considerarse en planes de desarrollo regional. Puesto que una de las manifestaciones de la volcán son las exhalaciones, acompañadas de ceniza, se desarrolló este documento que recopila las contribuciones de investigadores nacionales especialistas en la materia.

La actividad del Popocatepetl se ha manifestado al arrojar fragmentos incandescentes y ceniza que pueden afectar negativamente la aeronavegación y la infraestructura aeroportuaria de la zona. Estudios recientes apuntan a limitar la altura en que las aeronaves pueden volar sobre el cráter, así como a señalar que la caída de ceniza depende, entre otros factores, de la dirección de los vientos. Así, se pueden distinguir distribuciones preferenciales de ceniza según el mes del año.

A partir de escenarios de depósitos de ceniza generados por potenciales erupciones del Popocatepetl, se ha concluido que en todos los casos de escenarios de mayor probabilidad relativa (alturas de columna menores de 15 km), los máximos espesores esperados de ceniza depositada no cambian en forma muy significativa entre, por ejemplo, Texcoco y Tizayuca. En los casos de menor probabilidad relativa, correspondientes a erupciones de gran escala, los espesores en estos dos sitios impedirían cualquier operación aeronáutica.

Un análisis de las experiencias nacionales e internacionales de la aeronavegación y operación aeroportuaria ha permitido identificar algunas recomendaciones de tipo preventivo, así como de mitigación del efecto de las cenizas. Asimismo, se han incorporado recomendaciones para la construcción de infraestructura aeroportuaria que tomen en consideración amenazas de este tipo. Destaca la necesidad de contar con sistemas de la más avanzada tecnología para la detección, monitoreo y alertamiento de nubes de ceniza. Esta herramienta debe formar parte de un sistema aeroportuario en zonas susceptibles a depósitos de ceniza.

1. INTRODUCCIÓN

Después de cerca de 75 años de quietud, en 1990 el volcán Popocatepetl comenzó a mostrar signos de reactivación interna manifestada por un incremento paulatino de la sismicidad debajo del cráter y externamente, con fumarolas densas y calientes. Esta fase culminó en la madrugada del 21 de diciembre de 1994 con un importante evento eruptivo acompañado de una abundante emisión de ceniza que fue precipitada sobre la ciudad de Puebla. Para sorpresa de la población en general, particularmente para los habitantes de las zonas aledañas al volcán, el Popocatepetl se había reactivado siendo la noticia del momento. Fue el comienzo de un periodo eruptivo que persiste a la fecha. Evidentemente esta erupción fue motivo de gran preocupación por parte de las autoridades por el poco conocimiento que se tenía sobre el volcán y la incertidumbre sobre su actividad futura. Aunque diferentes investigadores de la UNAM habían ya iniciado distintos estudios y observaciones años antes y se tenían operando ya algunas estaciones básicas de monitoreo sísmico por parte de la UNAM y del CENAPRED, no se tenía un plan coordinado de acciones para afrontar una eventual emergencia volcánica. Frente a esta situación, el gobierno y la autoridades de Protección Civil, con la participación de investigadores de la UNAM y del CENAPRED, decidieron optar por la evacuación parcial de la población asentada en el sector oriental del volcán. Fue para todos una importante e inolvidable experiencia. A más de seis años de ocurrido este evento, se ha avanzado significativamente en el conocimiento, prevención y atención de este fenómeno. Se cuenta ahora con un moderno y eficaz sistema de monitoreo y vigilancia, un destacado grupo de científicos que estudia y evalúa permanentemente la actividad del volcán y sobretodo, se tiene elaborado un amplio plan integrado de operación que permite hacer frente a cualquier nueva contingencia volcánica, como la que presentó el Popocatepetl en diciembre de 2000. Es posiblemente uno de los volcanes más vigilados en la actualidad.

Una de la manifestaciones externas más importantes, casi cotidiana, de este volcán son las exhalaciones que con frecuencia van acompañadas por ceniza, la cual es expulsada hacia la atmósfera en cantidades y alturas variables. La presencia de estas partículas volcánicas suspendidas en el aire y su posterior precipitación, son evidentes motivos de preocupación para la aeronavegación y la infraestructura aeroportuaria existente en la zona aledaña al volcán, debido a la amenaza que este fenómeno representa para las aeronaves. Particularmente este problema se agrava debido a la ubicación del volcán en un área de intenso tráfico aéreo y la presencia de importantes aeropuertos en un radio de 200 km.

Tres aspectos destacan en esta problemática: la amenaza de la cenizas para las rutas aéreas cercanas al volcán; el riesgo para las aeronaves en rutas distantes expuestas a ingresar inesperadamente en nubes extendidas de ceniza y

finalmente, la afectación de la infraestructura y operación de los aeropuertos en la vecindad del volcán.

A lo largo de los últimos años, el CENAPRED ha colaborado ampliamente con las autoridades aeronáuticas, particularmente con las del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México a fin de monitorear y alertar en lo posible, sobre la presencia de cenizas del volcán Popocatepetl. Las medidas preventivas adoptadas han sido, en general, efectivas y han permitido operar con índices de seguridad aceptables. Sin embargo, es conveniente revisar con cuidado nuevamente los procedimientos y buscar nuevas y más eficaces formas de detección, aviso oportuno y seguimiento de este complejo fenómeno. Lo anterior y la reciente propuesta de construcción de nuevos aeropuertos en esta zona de influencia volcánica, han motivado a investigadores del CENAPRED y del Instituto de Geofísica de la UNAM, iniciar este estudio independiente sobre las cenizas del volcán Popocatepetl y sus posibles efectos para la aeronavegación.

El presente trabajo es un reporte que se inició en junio del 2001 y está compuesto de resultados preliminares de investigaciones exhaustivas sobre el tema. Este primer estudio es una revisión general sobre la amenaza de las cenizas y su repercusión para la aeronavegación y la operación aeroportuaria. Tiene, como principal objetivo, el análisis del fenómeno basado en las experiencias del monitoreo y vigilancia del volcán Popocatepetl en los últimos años. El estudio está estructurado por capítulos con temas específicos en la materia. Trata de responder a algunas preguntas fundamentales, entre otras, sobre el por qué y cuándo se presentan las cenizas, cuáles son los mecanismos básicos de transporte y hacia dónde se dispersan, qué área de afectación tienen, cómo se detectan y cuáles son sus efectos para la aviación en tierra y en aire y qué medidas preventivas básicas pueden adoptarse. En síntesis, el presente trabajo trata de abordar el tema de las cenizas volcánicas en una primer revisión general y en un contexto amplio buscando propiciar y estimular nuevas investigaciones y estudios más profundos y de mayor alcance.

El trabajo está compuesto por contribuciones de investigadores estudiosos del tema, quienes han preparado, a título personal los capítulos contenidos en este documento. Los puntos de vista y la información incluidos en la capítulos son responsabilidad de los autores.

Se agradece la valiosa participación del Dr. Sergio Alcocer en la coordinación de este trabajo y de Oscar Zepeda en la edición del mismo.

2. HISTORIA DE LA ACTIVIDAD RECIENTE DEL POPOCATÉPETL (1354-1993)

S. de la Cruz Reyna, J.L. Quezada, C. Peña, O. Zepeda y T. Sánchez

2.1 Introducción

A lo largo de su historia, el Popocatépetl ha mostrado un amplio espectro de formas de actividad eruptiva. En términos generales puede decirse que en el pasado, ese volcán ha producido numerosas erupciones de carácter menor, algunas mayores y un número pequeño de grandes eventos paroxismales. De las categorías mayores persisten evidencias geológicas en forma de depósitos volcánicos, que permiten inferir muchos de los aspectos de la naturaleza del Popocatépetl y de sus erupciones. Sin embargo, la actividad menor rara vez deja depósitos persistentes, que puedan ser analizados años o siglos después. Es por ello importante incluir una relación de aquella actividad del Popocatépetl, que sin haber dejado depósitos susceptibles de análisis por los geólogos, ha sido presenciada por testigos que la han reportado y descrito con diferentes grados de detalle. Es evidente que la cantidad y precisión de los reportes se incrementa con el tiempo.

Cuando es posible, se intenta comentar la actividad histórica con el objeto de crear un contexto en el que se pueda analizar la actividad actual. Se busca transmitir al lector no especializado la conciencia de que la época que vivimos representa solamente un instante en la vida activa del volcán.

Al leer estos reportes es importante mantener una percepción lo más objetiva posible, que tome en cuenta cómo distintos testigos pueden describir un mismo fenómeno en términos muy diferentes, que dependen en gran medida de sus experiencias previas. No se intenta asociar valores de magnitud o intensidad (esto es valores de Índice de Explosividad Volcánica VEI) a los eventos descritos aquí, por razones que se discuten al final de la cronología.

2.2 Cronología del Volcán Popocatépetl

1 3 5 4

- (V Tochtli). "A los treinta y un años de la fundación de la ciudad (de México), comenzó a salir el fuego del volcán". Es la mención más antigua que hayamos encontrado acerca de las erupciones del Popocatépetl [1]

Este reporte posiblemente refleja efectos remanentes de la última de las erupciones mayores que han ocurrido en el Popocatepetl alrededor del año 900 o 1000. Es difícil estimar la magnitud de este evento a partir de un reporte tan escueto, pero la ausencia de menciones posteriores podría indicar que fue una actividad menor.

1 3 6 3

- Rescatada la evidencia de la lengua náhuatl, Fernando Alvaro Tezozomoc escribió en 1609 en su Crónica Mexicatotl: *"107. Ce acatl, 1363 años, iquac ipanin peuh in Popocatepetl in yeyepoca, iquac in mic in Tenochtzin, in teyacan Tenochtitlan cempohuallon caxtollí ipan nauh xihuitl, aih inic compa Culhuacan quitlallique Mexica, inic mocempohua yepohuallon macuillo Xihuitl inic teyacan"* [2]

Traducido al español por Adrian León, dicho pasaje náhuatl indicaba: *"107. Año I caña 1363. Cuando comenzó a humear el Popocatepetl, fue cuando murió Tenoczin, quien acaudillara a Tenochtitlán durante 39 años; y desde que le establecieron los mexicanos en Culhuacán se cuentan entonces por todo 65 años de que acaudillara"* [3]

El uso de fenómenos naturales, tales como episodios de actividad del volcán, como puntos de referencia temporal para describir sucesos históricos sugiere dos cosas: a) Se trata de eventos bien definidos en el tiempo, i.e., se define un cambio en el nivel de actividad del volcán. b) El evento es de importancia relativa menor, o la relación de referencias estaría invertida. Por otro lado, la ausencia de comentarios sobre la actividad anterior, de 1354, sugiere que aquella también fue probablemente una actividad menor.

1 5 0 9

- *" Año de 4 casas y de 1509, vieron una claridad de noche que duraba (duró) más de 40 días; dicen los que la vieron que fue en toda esta Nueva España, que era muy grande y muy resplandeciente, y que estaba en la parte Oriente, y que salía de la tierra y que llegaba al cielo. En este año se alzó el pueblo de Coçola que esta a seis leguas de Huaxaca, contra los mexicanos, los cuales fueron sobre él y no dejaron hombre á vida segun dicen los viejos que en ello se hallaron. Esta fue una de las maraviallas que ellos vieron antes de que viniesen los cristianos y pensaban que era Queçalcoatle al cual esperaban". "Las pinturas de los códices Telleriano-Remense y Vaticano, representan el fenómeno en figura del fuego ó del humo saliendo de un promontorio de tierra y elevándose hasta el cielo; desprendiéndose algunos puntos, indicantes de la arena, como cayendo en lluvia." En nuestro concepto, aquello fue una erupción del volcán Popocatepetl, situado al S.E. de México; Así nos lo persuaden las descripciones y las pinturas, sólo que los interpretes no supieron darse cuenta del fenómeno anotado en los anales.* [4]

Este reporte es un tanto confuso en cuanto a fechas. Aparentemente se mezclan dos eventos distintos: El evento de 1509 parece referirse a un resplandor al Oriente, que podría estar asociado con alguna actividad del Popocatepetl, aunque

también podría estarlo con actividad del Pico de Orizaba o del San Martín Tuxtla. También podría tratarse de un evento no volcánico, como un incendio forestal. Orozco y Berra relaciona este evento con el glifo del código Tellerianus Remensis, el cual posiblemente describe la actividad mayor de hace 1000 o 1100 años. La gran pluma o columna eruptiva del código, que llega a las estrellas, con ceniza o arena cayendo como lluvia, podría ser indicativa de aquella actividad Pliniana. La magnitud de la actividad reflejada en el código Tellerianus Remensis contrasta por ejemplo con la de glifos, como el del código Quauhtinchan que muestran al Popocatépetl (al lado del Iztaccíhuatl) con una leve pluma fumarólica. Los argumentos de que existía una conciencia entre los indígneas de aquella erupción Pliniana, y de la distinta naturaleza de los episodios de actividad más reciente se refuerzan con los hallazgos del Dr. Atl [4a], quien expresa: *"En el edificio Noroeste, especialmente arriba de la Loma de los Rayos, en el gran Declive Arenoso, y en la Herradura de Ocotala, las capas de pómez, arenas y proyectiles cubren totalmente todas las superficies, con excepción de los flancos de los acantilados"..."Bajo estas capas superficiales se encuentran formaciones más antiguas, y entre ellas una muy importante que aparece sobre todas las corrientes Noreste...siguiendo siempre las ondulaciones de los lomos primitivos. A veces parece cubierta por capas de tierra vegetal...pero esta capa de piedra pómez no varía su anchura de 30 centímetros, fácilmente medible en todas partes"..."Puede afirmarse que las manifestaciones explosivas, por lo menos las últimas, se verificaron en períodos contemporáneos a la presencia del hombre. Para cerciorarme de este hecho busqué las noticias relativas en las leyendas toltecas y aztecas, en los códigos mejicanos, en los símbolos petrográficos, y sólo pude encontrar una alusión a probables catástrofes producidas por las erupciones del Popocatépetl, en la Monarchia Indiana de Torquemada"..."En el libro primero, capítulo XIV, de esta obra, se alude probablemente a tradiciones indígenas. Dice Torquemada que los toltecas fueron advertidos por los dioses de la necesidad de abandonar sus pueblos para no ser sepultados por la furia del volcán..."...Tuve la fortuna de encontrar bajo la tierra lo que ningún cronista había referido: restos de un pueblo, a 25 metros de profundidad, bajo las capas de cenizas, arena y piedra pómez -la misma capa de piedra pómez de 30 centímetros de espesor a que he hecho referencia más arriba-. Este hallazgo fué en el pueblo de Amecameca por los años de 1910 y en forma enteramente casual, al abrir un pozo. Consistió en varios cacharos de cocina: una ollita pequeña de barro pulido, sin engretar, un apaxtle, y además un metate junto al típico tlecuil, todo lo cual se encontraba al pie de un muro de adobe." ..."*¿Epoca? Dificil precizarla; pero juzgando por el estado y la cantidad de las capas superficiales compuestas de arena y pómez que se extienden bajo los mantos de tierra vegetal que forman el suelo de Amecameca, y que se vuelven a encontrar en los declives ponientes del volcán, no es lógico admitir que se trate de un período que nos separa del presente por muchos millares de años."

1 5 1 2

- "Año de 7 Navajas y de 1512... En este año "les parecía que humeaban las piedras tanto que llegaba el humo al cielo"... El símbolo, interpretado como el humear de las piedras nos parece decir que permanecieron aún los efectos de la erupción del Popocatépetl. [5]

Este reporte refleja lo que parece ser una actividad fumarólica, de explosividad baja o nula.

1 5 1 9

- *La actividad del Popocatepetl seguía en este año; ignoramos nosotros si era una nueva erupción o sólo continuación de las de 1509 y 1512; pero en el año de que tratamos, los españoles le vieron arrojar humo, cenizas y piedras incandescentes, durando este estado hasta 1528, según se colige de la noticia siguiente: "a la una de estas sierras, llaman los indios sierra blanca porque siempre tiene nieve; a la otra llaman sierra que echa humo, y aunque ambas son bien altas, la del humo me parece ser más alta, y es redonda desde lo bajo, aunque el pie baja y se extiende mucho más..." "Este volcán tiene arriba en lo alto de la sierra una gran boca, por la cual solía salir un gran golpe de humo, el cual algunos días salía tres y cuatro veces. Habría de México a lo alto de esta sierra o boca, doce leguas, y cuando aquel humo salía parecía ser tan claro como si estuvieran muy cerca, porque salía con gran ímpetu muy espeso, y después que subía en tanta altura y gordor como la torre de la iglesia mayor de Sevilla, aflojaba la furia y declinaba a la parte que el viento le quería llevar. Este salir de humo cesó desde el año de 1528, no sin grande nota de los españoles y los indios. Algunos querían decir que era la boca del infierno".[6]*

Otras referencias dicen para el mismo año:

- Cortés, en su Segunda Carta de Relación, escrita poco después de haber llegado a Cholula en 1519, dijo refiriéndose al Popocatepetl: "... a ocho leguas de Churutecal, estaban dos sierras muy altas y muy maravillosas, y de la una, que es más alta, sube muchas veces así de día como de noche un gran bulto de humo como de una gran casa; y sube encima de las nubes tan derecho como una vira que aunque arriba anda el viento muy recio no la puede torcer; no se puede ascender hasta la nieve que en la sierra hay y de los torbellinos que da la ceniza que de allí sale; el humo salía tal ímpetu y ruido que parecía que toda la sierra se caía abajo".[7]

- Ante ese mismo testimonio, Sebastián Musler menciona en su Cosmografía, impresa en 1540, "...una erupción acaecida en 1519. Esta noticia se relaciona tal vez con la que Cortés dió en su Segunda Carta de Relación." [8]

- Por su parte, Bernal Díaz y Gomara sostienen que Diego de Ordaz y un compañero suyo subieron al cráter y "...llegaron a lo postrero por debajo de un espeso de humo, y miraron un rato parecióles que tenían media legua de boca aquella concavidad en que retumbaba el ruido que estremecía la sierra, y por hondo y más como un horno de vidrio cuando más hierve." [8]. Relata Bernal Díaz del Castillo [8a]: "...el volcán que está cabe en Guaxocingo, echaba en aquella sazón que estábamos en Tlaxcala mucho fuego, más que otras veces solía echar, de lo cual nuestro capitán Cortés y todos nosotros no habíamos visto tal, nos admiramos de ello; y un capitán de los nuestros que se decía Diego de Ordaz tomóle codicia de ir a ver que cosa era, y demandó licencia a nuestro general para

subir en él y aun de hecho se lo mandó. Y llevó consigo dos de nuestros soldados y ciertos indios principales de Guaxocingo; y los principales que consigo llevaba poníanle temor con decirle que luego que estuviere a medio camino de Popocatepeque, que así llaman aquel volcán, no podría sufrir el temblor de la tierra y llamas y piedras y ceniza que de él sale, y que ellos no se atreverían a subir más de donde tienen unos cúes de ídolos que llaman los teules de Popocatepeque. Y todavía Diego de Ordaz con sus dos compañeros fue su camino hasta llegar arriba, y los indios que iban en su compañía se le quedaron en lo bajo, que no se atrevieron a subir, y parece ser, según dijo después Ordaz y los dos soldados, que al subir que comenzó el volcán a echar grandes llamaradas de fuego y piedras medio quemadas y livianas, y mucha ceniza, y que temblaba toda aquella sierra y montaña adonde está el volcán, y que estuvieron quedos sin dar más paso adelante hasta de ahí a una hora que sintieron que había pasado aquella llamarada y no echaba tanta ceniza y humo, y que subieron hasta la boca, que era muy redonda y ancha, y que habría en el anchor un cuarto de legua, y que desde allí se parecía la gran ciudad de México y toda la laguna y todos los pueblos que están en ella poblados."

- Otro de los testimonios de esa misma época es el registrado por Cervantes de Salazar en las páginas de la Crónica de la Nueva España, tomo tercero. Narra Salazar que una vez ganada la ciudad de México por Cortés y no teniendo pólvora para conquistar las demás provincias, llamó a Montañó y Mesa, el artillero, para formar la expedición que iría al cráter del Popocatépetl a recoger el azufre necesario para fabricar la pólvora, donde tenía la seguridad de encontrar azufre. Se proveyeron de lo necesario: *"Tomaron treinta y seis brazas de guindalesa en dos pedazos que pesaban dos arrobas y un balso de cáñamo para entrar en el volcán y cuatro costales de añejo, aforrados en cuero de venado curtido en que trajese el azufre."* Tocó a Montañó entrar siete veces en el cráter del cual extrajo cerca de ocho arrobas y media de azufre. En seguida entraron los otros compañeros hasta llenar los sacos y decidieron no entrar más, por que según Montañó dijo al cronista Cervantes de Salazar, *"era cosa espantosa volver los ojos hacia abaxo, porque allende de la gran profundidad que desvanecía la cabeza, espantaba el fuego y la humareda que con piedras encendidas de rato en rato, aquel fuego infernal descendía, y con esto, al que entraba, para aumento de su temor le parecía que o los de arriba se habían de descuidar, o quebrarse la guindalesa, o caer del balso u otros siniestros casos que siempre trae consigo el demasiado temor."* [9]

1 5 3 0

- En su Repertorio de los tiempos, Enrico Martínez citó que el Popocatépetl *"tornó a arrojar humo y dejó de hacerlo, conforme a esta cita: "en este mismo año de 1530, el Volcán que está á vista de México, cesó de hechar humo y estuvo así hasta el año de 1540."* [10]

1 5 3 9

-Reporta Bernal Díaz del Castillo [8a]: *.. "Después acá desde que estamos en esta tierra no le habemos visto echar tanto fuego ni con tanto ruido como al principio, y aun estuvo ciertos años que no echaba fuego hasta el año de mil quinientos treinta y nueve, que echó muy grandes llamas y piedras y ceniza. Dejemos de contar del volcán, que ahora que sabemos que cosa es y habemos visto otros volcanes, como son los de Nicaragua y los de Guatemala, se podían haber callado los de Guaxalcingo..."*

1 5 4 0

- Un cronista anónimo de 1550, cuyo manuscrito se encuentra en la Biblioteca Provincial de Toledo, asegura que *"...el volcán después de haber estado en reposo durante diez años, tornó a enfurecerse en 1540, poniendo el espanto en los vecinos de Huejontzingo y sus alrededores."* [11]

1 5 4 8

- Según el testimonio dejado por el Sr. Martínez Gracida, en ese año hubo una *"erupción del Popocatepec, arrojó lava y materias encendidas."*[12]

Las diversas descripciones que cubren el periodo 1519-1548, podrían ser aplicadas en su mayor parte a la actividad desarrollada por el Popocatepetl desde 1994. Cabe destacar una característica de los relatos: Este tipo de emisión de fumarolas y cenizas es común y frecuente en el Popocatepetl. Desde las grandes erupciones magmáticas de hace 1000 ó 1100 años, la actividad moderada, con abundante producción de gases azufrosos, que se prolonga por varios años, intercalada con periodos de crecimiento y destrucción de domos de lava, parece ser el modo dominante de actividad de ese volcán. Las ocho y media arrobas (casi 100 kg) de azufre puro, extraídas por montaña en 1519 apenas reflejan la abundancia de condensados de SO₂ y H₂S en el interior del cráter. La evaluación más precisa de la magnitud de la actividad del Popocatepetl en ese periodo, la refleja Díaz del Castillo en su frase *.. "Dejemos de contar del volcán, que ahora que sabemos que cosa es y habemos visto otros volcanes, como son los de Nicaragua y los de Guatemala, se podían haber callado los de Guaxalcingo..."*, sugiriendo el relativo bajo nivel de actividad del Popocatepetl comparado con volcanes de América Central. Diaz del Castillo posiblemente presencié algunas de las erupciones ocurridas en Nicaragua (El volcán San Cristobal tuvo una erupción importante en 1522, el Masaya en 1524 y 1529, el Telica en 1527 y 1529, el Momotombo en 1550 y el Mombacho en 1560) y en Guatemala (Fuego tuvo erupciones en 1524, 1526 y 1565 y Pacaya tuvo actividad explosiva en 1565).

1 5 6 2 - 1 5 7 0

Este periodo es particularmente intenso en cuanto a actividad tectónica y volcánica en otras partes de México. Se reportan cuatro terremotos, causantes de víctimas y una erupción del Citlaltépetl. [13]

1 5 7 1

- Reporta el Sr. Martínez Gracida: "*Erupción del Volcán Popocatépetl, arrojó muchas cenizas.*" [14]

1 5 9 2

- En una carta dirigida por el Conde de la Cortina a todos los editores de los periódicos de esta ciudad capital en 1815, se registra que en 1592 "*volvió a arrojar el Popocatépec vapores y cenizas.*" [15]

1 6 4 2

- En esa misma carta se establece que en 1642 otra "*erupción del Popocatépec: arroja humo y cenizas.*" [16]

El tono de estos tres reportes sugiere que estos episodios de actividad no tuvieron carácter destructivo y probablemente fueron similares a los evento del periodo 1519-1548, y por ende al actual.

1 6 6 3

- Las actividades del volcán en este período fueron descritas en parte, por el padre Betancourt (según Orozco y Berra) o Vetancurt (según Atl). Dice así el cronista en su **Teatro Mexicano, Volumen I**: "*Llámanle los naturales Popocatépetl, que quiere decir Cerro que Humea. Tiene una gran boca en la cima y echa por ella un penacho de humo tan grueso y tan espeso que se ve de muchas leguas subir por la región del aire. A veces arroja ceniza y la esparce a los comarcanos pueblos, y llega hasta Puebla, Tlaxcala, y hasta Chalco, ocho leguas de distancia. No es continuo el humo visible que cesa por muchos años. El año de 1594 cesó en octubre. El año de 1663, el trece de octubre a las dos (según Orozco y Berra, a las tres, según Atl) de la tarde levantó un plumaje de humo tan denso que obscurecía la región del aire; luego al año siguiente, continuando el humo, vispera de San Sebastián (Febrero 24 de 1664), á las once de la noche por la parte que mira a Puebla, cayó de la boca un pedazo con tanto ruido que se estremeció toda la ciudad y las ventanas y puertas se abrieron al golpe y el techo de las escaleras de nuestro convento se vino a abajo, y las puertas de las celdas se abrieron, y muchas de las casas de la ciudad. Hiciéronse rogativas y procesiones de sangre, pidiendo a Dios misericordia, por que*

la ceniza era en cantidad y con ella piedras que se hallaban menudas, livianas, como la piedra pómez, fuese cesado el humo y ahora es poco lo que despide que apenas se divisa." [16,17]

"En el tratado del Descubrimiento de las Indias y su Conquista, compuesto por don Juan Suárez de Peralta, vecino y natural de Méjico en el tercio del siglo XVI, y que también existe en la Biblioteca Provincial de Toledo", [18] se encuentran las siguientes noticias para el mismo período:

"Notable suceso. El Volcán de la Sierra Nevada." Este que llaman volcán, por la punta de ella está humeando a sus horas y momentos, y es tanto el humo, que estando el cielo muy claro, cubre todo de aquel humo que es muy espeso y blanquizco, que es muy de ver; en las mañanas cuando el sol sale empieza a humear, saliendo el humo claro y luego se espesa, y van pedazos de él con nubes por todo el cielo, y se ve salir por la boca que parece, y así se tiene por cierto, ser alguna boca del infierno".

"Subió al Volcán Antonio de Betanzos. Dicen han querido muchos subir a ver aquello, y no ha sido posible. Yo vi un caballero tío mío, que se llama Antonio Soltedo de Betanzos, que dió en subir a verle él y unos frailes, y se previnieron de ropa y todo lo necesario para contra el frío y los demonios; llevan muchas reliquias, agua bendita, cruces, misales para las oraciones, y gente con bastimento. Empezaron a subir y entrando por la ceniza, era tanta, que les fue forzoso dejar los caballos e ir a pie, y como iban llegando, más se les iban quedando indios muertos de frío, y los españoles proseguían su camino con determinación de no dejar de ver la boca de aquella sierra, mediante Nuestro Señor, a quien se encomendaban muy de veras; iban confesados y comulgados. Habiendo andado en dos días como tres leguas, con grandísimo trabajo, que no podían andar, que se atoraban en la ceniza, queriendo pasar adelante no fué posible, porque ya se les hundían los pies hasta más de la pantorrilla, y con mucha pena la sacaban y el frío era de manera que no eran señores de las manos ni de sí con llevar lumbre, con artificio, que les calentase, y por momentos el ajo y la bota, no bastaban. Acordaron de volverse, habiendo muerto más de quince personas de frío... él y los frailes, que cuando más iban llegando a la sierra oían un rumor grandísimo, que ponía temor, como cosa de herrería y éste algunas veces dicen los indios que viven en aquellos pueblos, que están a su falda, y aun españoles que lo oyen."

"Subió un Fraile al Volcán y lo Vió. Oí decir que un fraile, que no me acuerdo cómo se llamaba, luego que se ganó la tierra, él y otros cuatro españoles, y otros indios, subieron hasta la misma boca, la cual vieron y aguardaron que no humease. La grandeza de ella, dicen que les pareció debía de ser más de media legua y que lo que alcanzaron a ver, fué que parecía que el mundo se hundía de ruido, y que habían grandísimas llamas de fuego, y que cocía como una caldera y echaba de sí esta mala cosa mucha cantidad de piedra azufre, la cual llega muy cerca de los pueblos, y los indios la toman. Descubrése estas sierras desde leguas y se ve salir el humo, como de un horno, salvo que en grandísima cantidad".

1 6 6 4

-*"El día 24 de junio de 1664, arrojó gran cantidad de humo el volcán de Popocatéptl, lo que no había ocurrido desde 1530 (Disertaciones de Alamán, tomo 3, Apéndice, pág. 34) Lo de que el humo no se hubiera presentado desde 1530, parece totalmente falso en esta noticia" [16, 19]*

1 6 6 5

-En "El Mexicano", periódico bisemanal, en el número 75, tomo II, pag. 96, que se publicó en 1866, se encontró la siguiente noticia: *"1665. Este año, á 20 de enero, día de San Sebastián, reventó el volcán y duró en estar cayendo ceniza cuatro días: les cayó a mis padres, hayéndome de seis meses, de la Puebla a Nativitas"* No obstante, el propio Orozco y Berra cita que "Esta noticia se refiere a una erupción del Popocatépetl, y nos hace dudar entre si es esta misma ú otra erupción á la que se refiere Lorenzana en las "Cartas de relación", que se publicaron en 1770, fol. 25, en el que se lee: "XXV. El Exmo. Sr. Don Antonio Sebastián de Toledo, Márques de Mancera, casado con la Sra. D^a. Leonor Carreto, entró en el Gobierno á 15 de Octubre de 1665, que fué señalado, porque en él reventó el Volcán de México, y estuvo arrojando ceniza cuatro días." [20]

De esta relación de acontecimientos puede inferirse que en el periodo 1663-1665 ocurrieron varios episodios de actividad volcánica de mayor importancia relativa en el Popocatépetl, probablemente comparables con algunos del periodo 1519-1548. En particular llama la atención el pasaje del reporte del Padre Betancourt que dice *"...por que la ceniza era en cantidad y con ella piedras que se hallaban menudas, livianas, como la piedra pómez..."* La mención explícita a una caída importante de pómez y ceniza el 24 de febrero de 1664 hasta Puebla, podría sugerir la emisión de materiales magmáticos juveniles. Sin embargo, la ausencia de reportes de daños en poblaciones más cercanas al volcán, como Tochimilco por ejemplo, que ya contaban con edificaciones y núcleos importantes de población en esa fecha, podrían indicar que se trató de un episodio de explosiones moderadas de destrucción de domos de lava.

1 6 9 7

- Para el año de referencia, Alamán en sus Disertaciones, Apéndice, pág. 44, observa que *"El 20 de octubre de 1697, hizo una erupción de fuego el Volcán Popocatéptl."* [21]

1 7 2 0

- *"Este año hizo una nueva erupción el Popocatéptl"* .[22].

Los reportes de los eventos de 1697 y 1720 son vagos e inespecíficos, por lo que probablemente se trata de actividad menor.

1 8 0 4

- *"En 1804, el 20 de abril, el barón de Humboldt observó una erupción desde San Nicolás de los Ranchos en el camino de Puebla, pero su información se reduce a describir una columna de humo que salía de cráter."* [23]

1 8 2 7

- *"Abril 20 . Dos extranjeros; los señores Tuileur y Glennie subieron a la cumbre del Popocatépetl provistos de instrumentos apropiados para hacer observaciones y describieron que el cráter tiene la figura de un embudo de paredes poco inclinadas y cuyo fondo no se ve: estas paredes tienen surcos de arriba abajo, y otros circulares, los que siendo tres dividen la cavidad en cuatro fajas paralelas, de las cuales que empieza en la boca es la mas ancha y de piedra, las demás parecen de arena, la nieve solo ocupa la parte exterior; la boca es casi circular y su diámetro es de más de un cuarto de legua."* [24]

1 8 3 4

- Por su parte, el señor Federico Guerol y el Baron Luis Gross subió al Popocatépetl y observaron lo siguiente: *"...la boca del cráter tiene la figura de óvalo irregular cuyo diámetro mayor es como de 1800 varas, y el menor de 1430; y por tanto tiene más de una legua de circunferencia; las paredes interiores son casi perpendiculares a una profundidad de 280 a 350 varas, el fondo es algo más angosto que la boca y en él se ven dos respiraderos de humo de azufre, que no llega hasta arriba."* [25]

1 8 3 6

- Dos años después, *"el barón de Gross visitó las alturas del Popocatépetl encontrando el cráter en completo reposo."* [26]

1 8 4 2

- Con un interés más especializado, *"el geólogo Andrés del Río publicó algunas notas sobre Las ricas sulfataras del volcán y muestra estar de acuerdo con las observaciones de Humboldt y de Gross."* [27]

1 8 5 1

- En mayo 31 de 1851 Jesús M. Rios, publica sus observaciones de la visita al volcán Popocatépetl: *"...del labio inferior del cráter hasta donde está puesta la*

carrucha, hay una inclinación de 50 a 60 varas y de esta al fondo, en inclinación moderada, diez o doce, por tanto, la total profundidad será poco mas o menos de 150 varas: de circunferencia tendrá el cráter dos mil varas, que disminuyen hacia el fondo a manera de embudo hasta quedar este en tres o cuatrocientas. Al aproximarse al cráter se oye un ruido parecido al del agua que desciende de una cascada, y este lo ocasionan los respiraderos del fondo que vomitan humo y azufre con el estrépito que incendia el carbón la manga de soplo de una fragua."[28]

1 8 5 6

- Publicados en el Diario El Herald, en el mes de junio del año de referencia, el Ing. Civil Gaspar Sánchez Ochoa, hace del conocimiento público sus cálculos efectuados sobre la generación de algunos materiales por el Volcán Popocatepetl: *"De la plaza del cráter se eleva constantemente una columna de humo que se desprende de sus respiraderos, y estos humos recogidos producirían de veinte a treinta quintales diarios de azufre puro; el húmero en que yo hice mi experimento era tan débil que cuando la atmósfera estaba un poco cargada de electricidad ni aún se percibía."* [29]

1 8 7 0

- *"En 1870 el geólogo Antonio del Castillo estudió la producción de distintas sulfataras del cráter, el cual encontró en reposo."*[30]

Nuevamente, unas interesantes referencias a la explotación de azufre en el interior del cráter nos indican como el Popocatepetl ha sido un gran productor de gases magmáticos de azufre durante los últimos siglos. Un quintal equivale a 46.24 kg. 20 quintales diarios equivalen aproximadamente a una tonelada por día. El Ing Sánchez Ochoa estimó en 1856 que, con la tecnología de la época, sería posible condensar esta cantidad de azufre elemental diariamente, a partir de fumarolas que él consideraba débiles en ese momento. De los datos que aporta, es difícil inferir la producción de SO₂ y H₂S que pudiera haber generado el volcán en esa época, pero sin duda era alta.

1 8 8 4

- Enero 19. En telegrama dirigido por el presidente municipal de Jiutepec al director del Observatorio Meteorológico, decía: *"Participo a ud. que a las doce y veinte minutos de hoy se percibió ruido estrepitoso y prolongado rumbo al Popocatepetl, llamando la atención de todo el vecindario. Ignórase la causa"*. [31]

Es difícil interpretar este reporte como algún tipo de actividad del volcán. Incluso en la actualidad, se reciben ocasionalmente reportes de ruidos como este, que no son detectados por ninguno de los dispositivos de monitoreo.

1 9 0 0 - 1 9 1 8

- *"En 1900 el general J: Sánchez Ochoa se interesó por la explotación del azufre y emprendió varias exploraciones que dieron por resultado su extracción hasta 1907, el azufre siguió explotándose en pequeña escala hasta febrero de 1919. (De los informes químicos de esa época) sic., se desprende que el azufre del Popocatépetl no contenía arsénico."* [32]

Paralelamente, durante ese período, las ascensiones realizadas por el Dr. Atl al cráter del volcán le permitieron elaborar las siguientes observaciones minuciosas de su estructura geodinámica [33]: *"el perfil del cráter ha permanecido fundamentalmente el mismo desde que terminaron las grandes erupciones lávicas, seguramente en tiempos muy remotos."*

"El interior del cráter está formado por estratificaciones diagonales y horizontales de corrientes de traquitas, tezontle y capas de material detrítico."

"El aspecto de este gran pozo, en 1909, semejaba el interior de un inmenso horno de ladrillos apagado, con sus paredes de un color rojo vivo con grandes fajas grises entre las cuales salían los gases de algunas fumarolas."

"En la plazoleta del fondo, y junto a los derrumbes que forman las murallas, han existido siempre tres humeros (sulfataras) muy importantes, que antes de la erupción de 1919 tenían manchas grises salpicadas de puntos amarillos. De ahí se extraía el azufre. Hay otros humeros o sulfataras cerca de la antigua boca de la chimenea."

"Con excepción de las sulfataras, no se encuentra en el cráter ninguna otra boca o aparato volcánico, como han quedado en la mayor parte de los volcanes andesíticos del Valle de Méjico, pequeños conos o terrazas por las cuales se verificaron las últimas erupciones de todos ellos: Xitli, Hueitépetl, Xaltépetl, y otros conos y terrazas que no obstante su grande antigüedad permanecen perfectamente definidos."

"La antigua chimenea estuvo siempre obturada por escorias recubiertas por las rocas de los derrumbes, y sólo quedaban algunas pequeñas oberturas por las cuales salían periódicamente lentas columnas de vapor, y en muy raras ocasiones, nubes cargadas de cenizas. En ninguna parte del fondo, ni de los labios del cráter, ni en ningún lugar del volcán, se encuentran lavas modernas."

1 9 1 9

- Basado en numerosas observaciones de campo y en testimonios de personas que vivieron y/o presenciaron la erupción del Volcán Popocatépetl en febrero de 1919, el Dr. Atl afirma que dicho evento adquiere una importancia de primer orden en la historia de la geología y del conocimiento, que de ese fenómeno se tenía hasta este momento, ya que es el resultado de *"una acción puramente artificial"*. Es decir, que *"la apertura y conmoción de la chimenea central se debieron a una fuerte explosión de dinamita (inducida por una empresa extractora de azufre: sic), que provocó un verdadero sismo y la reaparición de la actividad explosiva, paralizada durante milenios."* [34]

"Estos datos y los que siguen me han sido proporcionados, en parte, por el único superviviente de la catástrofe, José Mendoza, y en parte, por Leonardo Santos, que fué el encargado de organizar el servicio de auxilio a las víctimas, que eran casi todas las gentes de Amecameca."

"De donde pusieron los cuetes salieron chorros de piedras que subieron muy alto en el aire, se desparramaron y cayeron por todos lados. Lo que a mí me dió más miedo fué ver cómo temblaron las paredes, y los chorros de piedras que caían de todas ellas."

"A pesar del estado tan débil en que yo me encontraba, podía darme cuenta de lo que estaba pasando en el cráter: en los lugares donde habían puesto los cuetes de dinamita, había remolinos de nieve que se levantaban y volvían a caer en el mismo lugar. A veces salían delgados chorros de vapor. Me parecía muy extraño. Muchas ocasiones quise acercarme a ver si podía calentarme, pero la nieve era muchísima, y no podía andar. Cuando nos sacaron y nos tendieron junto al malacate yo miré para abajo y ví cómo se había empezado a formar una pequeña laguna en todo el fondo, y en mero en medio salían borbotones de agua y chorros de vapor. Luego me bajaron y me llevaron hasta mi casa donde rápidamente volví a la vida."

Lo que pasó después lo testimonió Leonardo Santos: *"Se había amontonado mucha nieve en el fondo y el sol la había empezado a derretir y por entre aquel lodazal blanco salían grandes borbotones de aire, y gruesos chorros de vapor. Seguramente la dinamita abrió el volcán y por las hendiduras empezó a salir otra vez el fuego de adentro."*

"Resumiéndolos, estos datos demuestran que en marzo de 1919 se había empezado a formar un aparato volcánico sobre la antigua chimenea del volcán por el cual se iniciaron violentas manifestaciones fumarólicas."

El periodo comprendido entre 1720 (y probablemente desde 1697) a 1919 se caracteriza por la ausencia de reportes de erupciones, y por la relativa abundancia de expediciones al cráter que coinciden en describir una actividad solfatarica considerable. Esto sugiere que por un período de más de 200 años, el Popocatepetl mantuvo un régimen bajo en emisión de materiales sólidos, comparado con el periodo 1509-1720. Las descripciones de las solfataras cratéricas y las evaluaciones de su posible explotación comercial como fuente de azufre, sugieren que durante ese periodo probablemente el volcán mantuvo una considerable producción de SO₂.

1 9 2 0

- Continuando con sus observaciones, el Dr. Atl apunta: *"Si el cráter del volcán aparecía hasta febrero de 1919 como un horno de ladrillos apagado, desde 1920 semejaba un horno acabado de encender, lleno de humo y de cenizas y con un gran brasero en el fondo, cuyo fuego se avivaba constantemente por violentas corrientes de vapor."*

"Ese nuevo aparato presentaba en su centro dos grietas en las cuales el fuego era constante, muy visible aún a plena luz del día cuando era avivado por las explosiones. La bóveda tenía un diámetro aproximado de 50 metros por 19 de

altura y estaba proyectada con leve inclinación de Oriente Sur al Norte. Una corona de fumarolas muy activas las circundaba."

"En 1920 se producían violentas emisiones de vapor por la abertura central de la cúpula en formación, algunas veces acompañadas de humo espeso y de cenizas. Del 11 al 14 de noviembre de 1920, permanecí en observación en los labios y en el interior del cráter, y conté ciento ochenta, pudiendo apreciar su mecanismo."

"... desde principios de 1920 las explosiones adquirieron una invariable periodicidad: cada 8 días, precisamente los domingos, por la mañana entre 6 y 7 y por las tardes inmediatamente después de ponerse el sol, se verificaban erupciones que eran invariablemente las más importantes de toda la semana."[35]

1 9 2 1

- El 24 de marzo el diario Excélsior patrocinó una excursión al volcán, rica en incidentes y en fotografías, la que nunca tuvo la pretensión de asumir un carácter científico, lo cual no impidió al Dr. Atl registrar las siguientes observaciones: *"En efecto, el día anterior estando los miembros de la excursión en Tlamacaz vimos elevarse una enorme columna de humo a una altura aproximada de 3,000 metros sobre el cráter."*

"La cabeza de la caravana llegó al labio inferior de la gran boca a las ocho y media de la mañana del 25, y en ese preciso momento se verificó una formidable erupción de humo y de cenizas, y a nuestro alrededor cayeron algunas piedras como garbanzos y otras grandes, del tamaño de un huevo, todas fragmentos de antiguas escorias."

"Es necesario advertir que no hubo nunca en el Popocatepetl sismos que precedieran a las erupciones, y que, por el contrario, eran éstas las que provocaban trepidaciones locales en la parte superior del cono."

"Durante todo el año de 1921 las emisiones de vapor de agua y de cenizas fueron muy considerables y se verificaron cotidianamente, y en algunos días hubo diez, quince, veinte y hasta cincuenta, algunas de ellas muy potentes. La cúpula del fondo parecía continuar lentamente su evolución, con el levantamiento de su parte central."

El día 10 de diciembre de 1921 se produjo una erupción muy violenta, fuertemente cargada de cenizas, que se elevó en la atmósfera a una altura aproximada de 6,600 metros sobre el borde del cráter del volcán, y duró en la atmósfera más de 4 horas..."[36]

1 9 2 5

-Reporta Atl: *"El 23 de junio de 1925 presencié en las faldas de la Iztaccíhuatl, a una altura de 4,000 metros, tres explosiones muy violentas (del Popocatepetl), que se produjeron en el espacio de 4 minutos. Fueron densas nubes de un color negruzco que dejaron sobre las faldas de la parte sur del volcán una gruesa ceniza"*.

"En una sola ocasión, durante mis largas observaciones, pude ver un verdadero pino formado por una erupción a chorro continuo que empezó justamente al salir el sol y perduró en la atmósfera cerca de tres horas." (Dic., 1925) [37]

Las descripciones de la actividad desarrollada a partir de 1920 indican un retorno al nivel reportado para los siglos XVI y XVII. Atl parece sugerir que este nuevo episodio pudiera haber sido disparado por las explosiones de dinamita de 1919, pero probablemente se trate de una coincidencia. Las manifestaciones descritas por Atl y otros observadores son así mismo muy similares a las observadas en el periodo 1993-1995.

1 9 8 1 - 1 9 8 9

Robin y Boudal publican entre 1981 y 1989 una serie de artículos donde se establecen los riesgos potenciales asociados al volcán Popocatepetl. Particularmente enfatizan la posibilidad de que, aparte de una actividad piroclástica mayor, pudieran desarrollarse en el Popocatepetl eventos del tipo Bezymianny o Mt. St. Helens, que involucran la demolición de parte del edificio volcánico y la subsecuente producción de devastadoras avalanchas de escombros. En julio de 1987 se instala por el Instituto de Ingeniería de la UNAM la estación sismológica telemétrica "Altzomoni" a 4 km de Paso de Cortés y a 11 km al norte del cráter del volcán. En septiembre de 1989 el Instituto de Geofísica de la UNAM instala la estación sismológica telemétrica "Tlamacas", a un poco más de 4 km al norte del cráter. El volcán permanece en calma y frecuentes expediciones al cráter y a su interior reportan la existencia episódica y estacional de una pequeña laguna cratérica.

1 9 9 2 - 1 9 9 3

De forma gradual se inicia una reactivación de la actividad fumarólica del volcán hacia fines de 1992 y principios de 1993, que en esta ocasión es posible seguir por medio de las observaciones sismológicas. Se cuentan varios microsismos volcánicos por día en promedio. Se instala una red de monitoreo geodésico en febrero 1992.

1996

Aparece el primer domo de lava en el fondo del cráter.

2.3 Discusión y Conclusiones

Las descripciones de los episodios de actividad en los siglos XVI, XVII y principios del XX podrían ser aplicadas a lo observado en el periodo que se inició en 1993. La naturaleza de la actividad parece ser la misma: erupciones que liberan grandes

cantidades de gases magmáticos y que arrastran materiales depositados en el conducto volcánico, alternada con episodios de crecimiento y destrucción explosiva de domos de lava.

En resumen, de los eventos descritos arriba, aquellos de 1509, 1512, 1519-1530, 1539-1540, 1548, 1571, 1592-1594, 1642, 1663-1665, 1697, 1720, 1920-1925 y 1993-1995 parecen ser muy similares. Este tipo de episodios aparenta ser capaz de alcanzar duraciones cercanas a 10 años, pero los reportes sugieren una tendencia promedio a duraciones menores.

La alta productividad de gases magmáticos de azufre parece ser otra característica común de estos episodios y de los periodos de relativo reposo entre ellos. Los condensados de azufre en el cráter probablemente provienen de reacciones como $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \leftrightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$, a temperaturas del orden de la ebullición del agua a la altitud del cráter.

Si el tipo de actividad que se desarrolla en la actualidad es de la misma naturaleza que la desarrollada en los 12 episodios previos reportados desde el siglo XVI, podría concluirse que las emisiones actuales podrían mantenerse varios años, sin generar mayores consecuencias. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el potencial de que se desarrolle una erupción magmática explosiva de mayor magnitud existe, y que si bien la probabilidad de ocurrencia de tal desarrollo es relativamente menor a la del evento actual, el riesgo que representa requiere considerarla muy seriamente en los planes de preparación y en cualquier otro plan de desarrollo nacional o regional.

2.3 Referencias Bibliográficas

[1] **Orozco y Berra, Manuel:** "Historia Antigua y de la Conquista de México", Tomo III, pág. 169. *cit.pos* **Orozco y Berra, Don Juan** en ***Efemérides Sísmicas Mexicanas. Memorias de la Sociedad Científica Mexicana, "Antonio Alzate"***, *Imprenta del Gobierno en el *(Adiciones y Rectificaciones). Ex-Arzbispo, Tomo II, México, 1888, pág. 261

[2] **Alvaro Tezozómoc, Hernando:** "Crónica Mexicatotl, 1609." Trad. Adrián León, 1949. *cit.pos* **Yarza de la Torre, Esperanza**, en ***Volcanes de México***, M. Aguilar, Editor, México, 2ª edición corregida y ampliada, 1971, pág. 136.

[3] *cit.pos*, **Yarza de la Torre, Esperanza** en ***Volcanes de México***, pág. 136

[4] **Orozco y Berra, Manuel:** "Historia Antigua y de la Conquista de México", Tomo III, pág. 466, *cit.pos* **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, pág. 262.

[4a] **Dr. Atl.** ***Volcanes de México. Vol I La Actividad del Popocatepetl***, Editorial Polis, México, 1939, Pag 13.

[5] *ibidem*, **Orozco y Berra, Don Juan**, pág. 263.

- [6] *idem*, **Orozco y Berra, Don Juan**, pág. 264.
- [7] **Cortés, Hernán**: "Segunda Carta de Relación", *cit.pos*, **Dr. Atl** en **Volcanes de México, Vol. I La Actividad del Popocatepetl**, Editorial Polis, México, 1939, pág. 14.
- [8] **Musler, Sebastián**: "Cosmografía", 1540, *cit.pos*, **Dr. Atl**, **Volcanes de México**, pág. 16
- [8a] **Díaz del Castillo, Bernal**: "Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España. 15ª Ed. Porrúa, México, 1992. Pág. 136.
- [9] **Cervantes de Salazar**: "Crónica de la Nueva España", Tomo tercero.*cit.pos*, **Dr. Atl**, *op.cit*, Pág. 15
- [10] **Orozco y Berra, Manuel**: "Historia Antigua y de la Conquista de México", Tomo IV, pág. 234.*cit.pos*, **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, pág. 264.
- [11] *cit.pos*, **Dr. Atl** en **Volcanes de México**, pág. 16.
- [12] **Orozco y Berra, Don Juan**, **Efemérides Sísmicas Mexicanas. Memorias de la Sociedad Científica Mexicana, "Antonio Alzate"**, Imprenta del Gobierno en el Ex-Arzobispado, Tomo I, México, 1887, pág. 308.
- [13] **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, Tomo I, pág. 309.
- [14] *ibidem*, **Orozco y Berra, Don Juan**, Tomo I, pág. 309.
- [15] *cit.pos*, **Orozco y Berra, Don Juan**, Tomo II, pág. 266.
- [16] *ibid*, **Orozco y Berra, Don Juan** pág. 267.
- [17] *cit.pos*, **Dr. Atl**, en **Volcanes de México**, pág. 16.
- [18] *cit.pos*, **Dr. Atl**, pp. 17 y 18.
- [19] **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, Tomo I, pág. 315.
- [20] **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, Tomo II, pág. 288.
- [21] *cit.pos*, **Orozco y Berra, Don Juan**, Tomo II, pág. 268.
- [22] **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, Tomo I, pág. 325.
- [23] *cit.pos*, **Dr. Atl**, *op.cit*, pág. 18.
- [24] **Calendario de Galván. Colección LaFragua**, 351/LAF, Antigua Librería de Murguía, S.A., México, 1836, pág. 11.

[25] *ibid*, **Calendario de Galván**, pág. 12.

[26] *cit.pos*, **Dr. Atl**, *op.cit*, pág. 18

[27] *cit.pos*, **Dr. Atl**, pág. 18.

[28] **Ríos de Jesús, M.: *Ascensión al Popocatepetl (Algunas Observaciones para los Viajeros que lo Intenten)***, La Ilustración Mexicana, Colección LaFragua, CIB/LAF, México, 1851, pág. 423.

[29] **Gaspar Sánchez Ochoa: *El Heraldo***, México, junio de 1856.

[30] *cit.pos*, **Dr. Atl**, *op.cit*, Tomo I, pág. 18.

[31] **Orozco y Berra, Don Juan**, *op.cit*, Tomo I, pág. 495.

[32] **Dr. Atl**, *op.cit*, Tomo I, pp.18-19.

[33] *ibid*, pp. 20-23.

[34] *idem*, pp.23-27.

[35] *id*, pp. 28-29.

[36] *id*, pp. 31-33.

[37] *id*, pág. 34

3. RESUMEN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL DE DICIEMBRE 1994 A MAYO 2001

Carlos Valdés, Servando de la Cruz, Alicia Martínez, Roberto Quaas Weppen y Enrique Guevara Ortíz

3.1 Diciembre de 1994 a 1997

Desde 1993, el volcán Popocatepetl comenzó a mostrar una creciente actividad al incrementarse su actividad fumarólica y sísmica hasta llegar al 21 de diciembre de 1994. En ese día se produjo la primera emisión de ceniza en cerca de 70 años, la cual produjo gran inquietud entre la población y autoridades. Esto provocó que algunos de los poblados más vulnerables en el flanco noreste tuvieran que ser evacuados. A lo largo de 1995 persistió actividad fluctuante, aunque decreciente. En marzo 5 de 1996, el volcán inició un nuevo episodio de actividad con nuevas emisiones de ceniza comparables con las de diciembre de 1994. Al final de marzo de 1996 se observó el crecimiento de un domo de lava en el fondo del cráter. Algunas explosiones importantes acompañaron este crecimiento. La mayor ocurrió el 30 de abril de 1996 cuando cinco alpinistas, ignorando las advertencias de peligro, perecieron al escalar el volcán. El domo siguió creciendo a una tasa moderada hasta julio de 1996, cuando paulatinamente comenzó a decrecer. Para septiembre de 1996, la tasa de crecimiento ya no pudo ser medida y las emisiones de ceniza comenzaron también a ser más pequeñas.

Después de septiembre de 1996, las emisiones de ceniza fueron cada vez menos frecuentes pero mayores en intensidad y con una tendencia a ser más explosivas. Exhalaciones importantes se observaron en octubre 28 y 31; noviembre 27 a 29, diciembre 2, así como en diciembre 5, 7 y 29. Este tipo de actividad continuó en 1997. Algunas grandes eventos explosivos ocurrieron en enero 5, 12, 17, 19, 23 y 29; febrero 4, 5, 8, y 25; marzo 19, 20; abril 24 y 29; mayo 11, 14, 15, 24 y 27; junio 3, 11, 14, 19, 21 y 30; así como en julio 2.

El evento del 30 de junio es el más grande registrado, hasta este tiempo desde que inició la actividad en el presente episodio que inició a finales de 1994. La erupción fue precedida por una serie de sismos volcano-tectónicos que iniciaron a las 22:56 h de ese día. Varios sismos con magnitud en el rango de 2 a 2.7 fueron detectados a lo largo de un intervalo de 13 minutos. Un tremor, indicando el inicio de la erupción comenzó a las 23:11 h. La erupción tuvo dos pulsos principales. El primero duró 135 minutos. El segundo, inició a las 01:26 h del 1° de julio y duró alrededor de 90 minutos. El radar doppler, operado conjuntamente entre el USGS (United States Geological Survey) y CENAPRED, mostró fuertes señales reflejadas de la columna de ceniza durante la erupción.

Esta erupción generó una enorme pluma que alcanzó en unos pocos minutos los 8 km por encima del volcán. Durante las siguientes 2 a 3 horas, caída de ceniza fue reportada en muchos poblados alrededor del volcán, incluyendo la ciudad de México. No se registraron daños o víctimas derivadas de la erupción. El aeropuerto de la ciudad de México tuvo que ser cerrado por cerca de 12 horas hasta que la ceniza depositada en las pistas pudo ser lavada. Fragmentos de pómez de hasta 10 cm cayeron en Paso de Cortés y a lo largo de varios kilómetros de la carretera al poblado de Amecameca. No se dañó ninguno de los dispositivos de monitoreo incluyendo aquéllos instalados en las partes altas del volcán, en donde evidencias de caídas de clastos fueron posteriormente observados.

La intensidad de la erupción se estima alcanzó el índice de explosividad (VEI) de 2 a 3 y condujo, por recomendación del Comité Científico Asesor del Volcán Popocatepetl, que el color del semáforo de alerta volcánica se pusiera por varias horas en color rojo, es decir, en máximo nivel de alertamiento, pero sin iniciar ninguna evacuación.

Durante los dos días siguientes algunos flujos de lodo fueron reportados en el poblado de Xalitzintla a 12 km al noreste del volcán. Estos flujos coincidieron con intensa precipitación de lluvia en las faldas del volcán y provocaron una pequeña inundación en una cañada en donde una casa fue parcialmente inundada. La inspección de la misma, así como de los árboles frutales y la milpa localizados en el área, demostraron que el flujo no fue violento ni escurrió a gran velocidad, sino que provocó progresivamente la elevación del tirante del río de lodo.

De acuerdo con las lecturas de amplitud sísmica, RSAM, el evento del 30 de junio por sí solo liberó una energía estimada de una décima parte del promedio de la energía sísmica anual liberada en los años anteriores. La fase de mayor intensidad duró poco más de 35 minutos y posteriormente decreció.

Vuelos en helicóptero sobre el cráter habían permitido observar una significativa subsidencia en la parte central del domo de lava que comenzó a crecer en el fondo del cráter del Popocatepetl antes del 30 de junio. Observaciones desde el helicóptero realizadas el 3 y 4 de julio permitieron detectar nuevas características en el volcán. En los flancos sur y sureste, varias lenguas de 1 a 2 km de longitud, que escurrieron radialmente del cráter, fueron evidentes. Estas lenguas han sido interpretadas como flujos granulares producidos por el colapso parcial de la columna eruptiva.

En el interior del cráter principal del volcán un nuevo cráter o depresión del cuerpo del domo de lava de 1996 pudo ser observada. Un cuerpo fresco de lava cordada fue observado creciendo dentro de esta depresión. Fotografías aéreas tomadas verticalmente por SCT, aunque difíciles de interpretar por la presencia de gran cantidad de gas, sugieren que el nuevo cuerpo de lava también tenía una forma similar a un cráter. Como una interpretación preliminar, parece que en las primeras fases de este evento, el domo previo fue parcialmente destruido por las explosiones formando un primer cráter. Después, lava fresca se derramó rápidamente hacia su interior. Esta rápida extrusión aparentemente produjo una fragmentación

significativa de este magma, generando la emisión grande de ceniza y el colapso del nuevo cuerpo fresco de lava, tomando una forma de cono invertido.

El nivel general de la actividad del volcán posterior a estos importantes eventos, decreció significativamente en las siguientes semanas hasta que el 12 de agosto se presentó una exhalación moderadamente grande con una emisión y columna de ceniza de 2 km de altura. La emisión perduró por poco más de 2 horas y provocó leve caída de ceniza en el flanco sureste del volcán.

Desde el evento del 30 de junio el color del semáforo de alerta volcánica se ha mantenido en amarillo pero, por recomendación del Comité Científico, las autoridades de Protección Civil mantienen máximas medidas de alertamiento y preparación.

Después del evento del 30 de junio de 1997, el volcán continuó con una actividad moderada. En los meses de noviembre y diciembre de ese año, los sismogramas registraron señales de tremor, que indicaban la formación de un nuevo domo de lava en el interior del cráter del volcán. Un sobrevuelo en helicóptero, el 10 de diciembre, confirmó la presencia del mayor domo de lava que se hubiera formado hasta la fecha desde el inicio de la actividad en diciembre de 1994 (ver fotografía).



10/dic/97 Popocatepetl, 10:35. Interior del cráter - este (foto: R.Quaas) p1210972.jpg

La imagen nos muestra un cuerpo de lava de cerca de 400 m de diámetro y del cual sale poco gas. El 24 de diciembre de 1997, el primer evento de destrucción de domo ocurrió por la tarde.

3.2 Actividad del Volcán Popocatepetl, Año 1998

Durante los primeros meses del año, el volcán presentó una actividad característica de la destrucción de los domos, mediante exhalaciones con carácter explosivo. Estos eventos ocurrieron en las siguientes fechas: 1 de enero; 11 de febrero; 21 y 28 de marzo; 21 y 28 de abril, 10, 16 y 17 de mayo; 13 de julio; 14 y 16 de agosto; 8, 21 y 23 de septiembre; 5, 17 y 24 de octubre, 9 y 19 de noviembre.

A partir del 22 de noviembre, a las 13:02 h (hora local), el volcán mostró un incremento sustancial en su actividad. Se detectaron exhalaciones continuas, así como episodios de tremor e incandescencia en la boca del cráter. Para el día 23, el nivel de actividad sísmica era mayor que el día anterior. Todo esto indicaba la presencia de un cuerpo de lava en el interior del cráter. Episodios de tremor armónico el día 24 por la mañana, corroboran la formación de un nuevo domo. Estos períodos de actividad estuvieron intercalados con períodos de calma. El día 25 a las 08:10 h se presentó la primera explosión que marca el inicio de una etapa explosiva intensa.

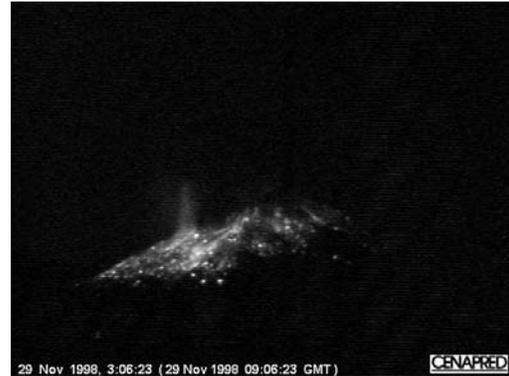


En las fotografías anteriores se puede ver, en secuencia de izquierda a derecha y de arriba a bajo, como la ladera oriental (lado izquierdo), se cubre de nubes blancas, que representan el polvo que levantan los impactos al caer. El día 26 se registran dos explosiones por la mañana, que emitieron columnas de ceniza y dos más por la noche.

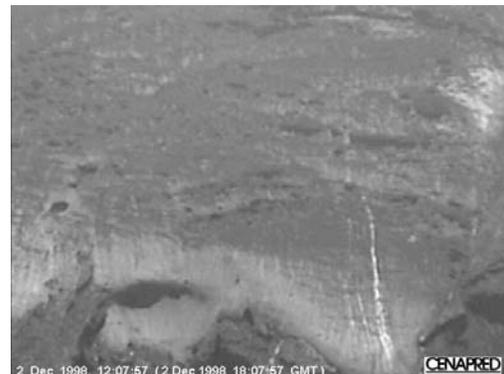
El día 27 se presentaron dos explosiones por la mañana (ver figura anterior) y una por la tarde. Algunas de estas explosiones mencionadas anteriormente, provocaron ligeras lluvias de ceniza en las poblaciones cercanas. EL día 28, la actividad continuó, con explosiones a las 02:42 h y a las 10:21 h (ver la siguiente figura), y con emisiones de ceniza por la tarde, que alcanzaron alturas entre 1.5 y 2 km sobre el cráter.



El día 29 ocurrieron cuatro explosiones, siendo la más importante la de las 03:05 h, que lanzó fragmentos incandescentes hasta 3 km de distancia del cráter (ver figura).



La explosión de las 06:54 h, produjo una columna de ceniza que alcanzó los 4 km de altura sobre el cráter (ver siguiente figura). Personal de vigilancia en Paso de Cortés, reportó una columna de más de 4 km de altura sobre el cráter en la explosión de las 16:45 h. El 26 de noviembre, el semáforo continuaba en Amarillo, pero el radio de restricción se incrementó a 7 km del cráter del volcán. El día 30 de noviembre ocurrieron 3 explosiones con características similares a las descritas anteriormente. En las figuras que siguen se muestran impactos en las laderas y las columnas de ceniza producidas por las explosiones.

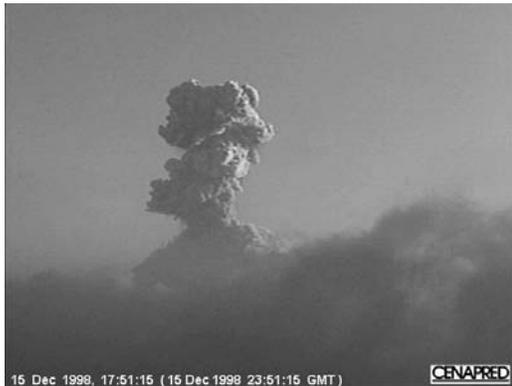


El 1° de diciembre, ocurrieron cuatro exhalaciones con cantidades regulares de ceniza (ver imagen anterior). El 2 de diciembre sólo se presentaron tres exhalaciones moderadas, y la buena visibilidad hacia el volcán permitió hacer acercamientos al glaciar, en donde se ven los cráteres producidos por los fragmentos calientes.

El 3 y 4 de diciembre, la actividad del volcán fue baja, con sólo dos explosiones (ver imagen siguiente).



Las explosiones continuaron los días 5 a 11, 15 y 16 de diciembre. (ver fotos siguientes)



El día 17 de diciembre, se presentó un explosión fuerte que lanzó fragmentos incandescentes en la cara norte del volcán (ver secuencia siguiente de fotos), los cuales llegaron hasta 4.5 km de distancia del cráter y provocaron incendios en la zona boscosa.



Del 18 al 21 de diciembre, la actividad del volcán fue baja, presentándose sólo algunas exhalaciones y explosiones menores. El 22 ocurrió un emisión de ceniza importante (ver siguiente fotografía), que produjo caída de ceniza en el sector noroeste del volcán.



El resto de diciembre de 1998, el volcán redujo su actividad explosiva y sólo se registraron esporádicas emisiones de ceniza y pequeñas explosiones. El proceso observado a finales de noviembre y diciembre es un proceso de destrucción del domo que se formó en el interior del cráter. El semáforo continuó en Amarillo y el radio de restricción en 7 km.

3.3 Año 1999

A principios de año continuó la actividad en bajos niveles, aunque con algunas pequeñas y moderadas exhalaciones de carácter explosivo, como las del 12, 13, 18 y 20 de marzo y 4 de abril.



El 16 de mayo empezaron a ocurrir pequeños flujos alrededor de las 18:30 h (tiempo local) ocasionados por la fusión de nieve y hielo del glaciar.



El sismo regional de magnitud 6.7, que ocurrió entre los estados de Puebla y Oaxaca, el 15 de junio, sólo provocó un incremento en la actividad sísmica del volcán sin mayores consecuencias.

Durante los siguientes meses se registraron exhalaciones que en ocasiones contenían ceniza, como las siguientes: 27 y 31 de agosto, 29 de septiembre, 3 y 4 de octubre, 4 de noviembre. Al final del año el Semáforo de Alerta Volcánica se mantuvo en Amarillo y la recomendación de no acercarse a menos de 5 km del cráter del volcán.



3.4 Año 2000

A principios del año se observaron esporádicas exhalaciones con ceniza.



A partir del día 12 de febrero, se registraron episodios de tremor armónico, que luego fueron asociados, el 25 de febrero, con la presencia de un pequeño cuerpo de lava (domo) en el interior del cráter de 50 m de diámetro por 11 de altura. Debido al incremento en la actividad, y a la posibilidad de algunas explosiones mayores, se recomendó cambiar el radio de seguridad de 5 a 7 km del cráter. El semáforo continuó en Amarillo Fase-2. Cerca de esta fechas, se comienza amencionar la fase del nivel amarillo. El 2, 17 y 18 de abril, ocurrieron exhalaciones con ceniza, asociadas a la destrucción del domo que se formó en el mes de marzo.



El día 24 de mayo, se reportó un flujo de lodo y rocas con una altura de 70 cm y 4 m de ancho en el puesto militar localizado a 3.5 km del cráter. Este flujo fue detectado por los instrumentos del CENAPRED, una hora y quince minutos antes de que llegara al puesto militar. La alerta continuó en Amarillo fase 2.

Después de un período de relativa calma, desde el crecimiento del domo más pequeño desde 1996, en febrero del año 2000 (que incluyó exhalaciones con ceniza los días 6, 18 y 19 de junio, 4 de julio, 4 y 10 de agosto), el volcán Popocatepetl mostró síntomas de actividad a principios de septiembre del 2000, lo que marcó el inicio de un nuevo episodio que ha producido el domo de lava más grande, desde 1994. Las principales características de esta nueva actividad, son las siguientes:

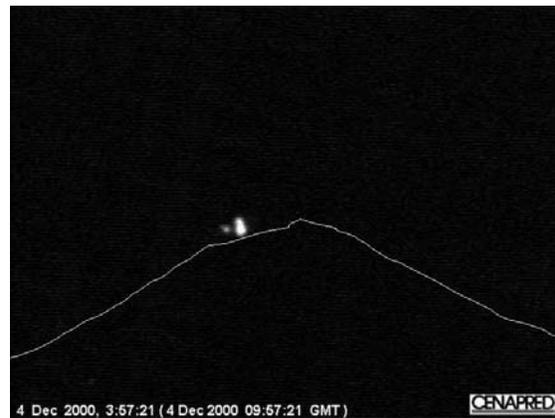
- Sismos tectono-volcánicos, debajo del cráter, seguidos por exhalaciones con duraciones de hasta 30 minutos.
- Incremento en el tamaño de la fumarola de las exhalaciones.
- Presencia de tremor armónico en la coda de las exhalaciones.
- Anomalías intensas de la radiación térmica en el cráter, observadas a través de imágenes del satélite GOES de la HIGP de la Universidad de Hawai (<http://goes.higp.hawaii.edu>).

La fecha del inicio de la extrusión de lava, probablemente ocurre en la segunda semana de septiembre del año 2000. Un vuelo sobre el cráter el día 15 de septiembre, permite la confirmación visual de un pequeño domo, que crece lentamente en el fondo del cráter del volcán. La actividad variable de exhalaciones de bajo nivel y de tremor, continúa todo septiembre. Durante octubre, una actividad mayor en las exhalaciones, produjo columnas de ceniza de entre 5 y 6 kilómetros sobre el cráter y provocó ligera caída de ceniza en los pueblos vecinos la volcán. La explosividad de esas exhalaciones se incrementó el 16 de octubre, cuando pequeños fragmentos incandescentes fueron lanzados del cráter en la parte más alta del flanco este del volcán.

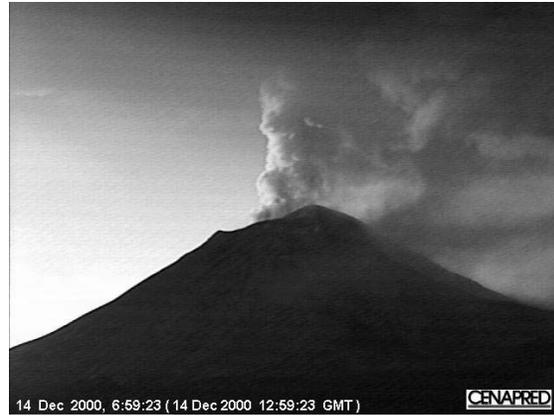
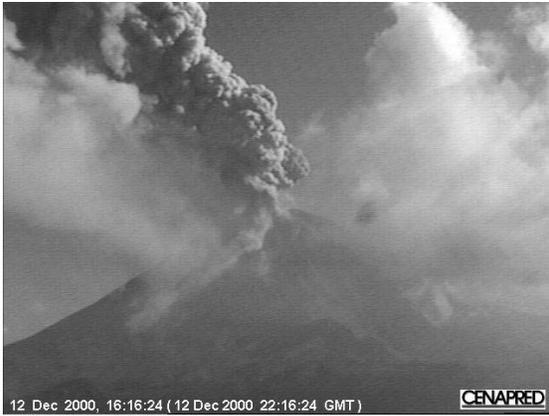
Un marcado incremento en el nivel de actividad interna se detectó el 1° de noviembre del 2000, al presentarse un enjambre de sismos volcano-tectónicos, que comenzó con un sismo de magnitud 3.1, localizado en el sector SE del volcán. Más sismos con magnitudes en el rango de 2.2 a 3.0 continuaron el 3 de noviembre, causando un incremento en el nivel de alertamiento. Esta actividad interna no fue reflejada por eventos externos excepcionales.

3.5 Diciembre del 2000

Una actividad, más bien baja, continuó hasta el final de noviembre y la primera semana de diciembre. El 2 de diciembre, la actividad de exhalaciones se incrementó de nuevo, con una moderada, pero larga exhalación con una emisión de ceniza que duró cerca de 90 minutos. El 6 de diciembre, ocurrió un enjambre de seis sismos volcano-tectónicos de baja magnitud ($M \sim 1.7-2.4$), el cual fue seguido por otro enjambre similar de eventos el 8 y 9 de diciembre. Estos sismos fueron antecedidos por un tremor armónico de gran amplitud y duración de 5 minutos; dicha amplitud fue la más grande observada hasta entonces, desde el inicio de la actividad del volcán en diciembre de 1994.



La actividad del volcán se incrementó de nuevo el día 12 de diciembre del 2000, con un gran número de exhalaciones (hasta 200 por día), muchas de ellas con emisiones de ceniza que alcanzaban entre los 5 y 6 km de altura sobre el volcán. Por la noche era posible observar incandescencia en el cráter y la emisión de algunos fragmentos incandescentes. Una actividad similar, pero con exhalaciones de mayor duración fue observada durante los días 13, 14 y 15, lo que produjo ligeras lluvias de ceniza en algunos poblados cercanos al volcán. Temprano, el día 15 de diciembre, se detectaron más episodios de tremor armónico de gran amplitud y baja frecuencia con duraciones de algunos minutos.



Ese día, a las 14:04 h, el tremor armónico de baja frecuencia creció a una asombrosa señal continua, con amplitudes en el nivel de saturación de los instrumentos en todas las estaciones de monitoreo, incluyendo las más lejanas. Estas señales fueron tan fuertes que la gente de poblaciones a distancias de 12 a 14 km las sintieron, además de que fueron registradas por estaciones de la Red Sismológica a distancias de 150 km del volcán. Este episodio de tremor armónico de baja frecuencia, duró, con ese nivel de intensidad, cerca de 10 horas. Estas señales fueron relacionadas con la extrusión de magma a una tasa muy alta.

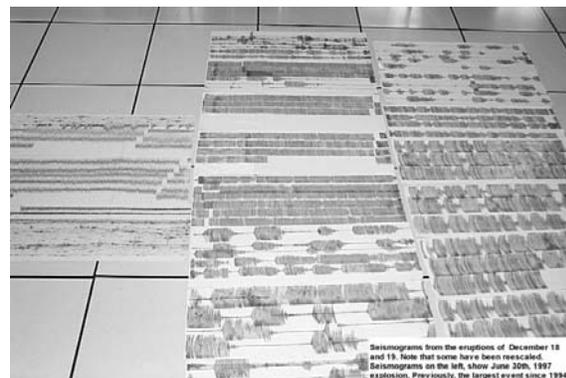
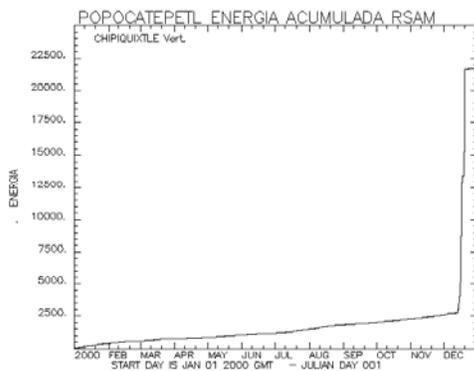


Una dramática caída en el nivel de actividad, ocurrió al comienzo de la mañana del 16 de diciembre, la cual fue seguida, 16 horas después, por una nueva señal de tremor armónico de baja frecuencia y con una amplitud creciente. De nuevo, esta señal alcanzó niveles de saturación en todas las estaciones de monitoreo sísmico, y duró cerca de 9.5 horas. Las amplitudes de estas señales fueron tan grandes, que varias de las plumillas de los registradores sísmicos se dañaron.

Por primera vez, desde que se instalaron, los inclinómetros (instrumentos que miden la deformación en las laderas del volcán) detectaron las señales de tremor. Los episodios de gran oscilación fueron contemporáneos con los episodios de tremor. La amplitud de las oscilaciones de los inclinómetros estuvieron en el rango de los 100 microradianes (un microradián es el ángulo que formaría una viga rígida de 30 metros de largo, que es alzada en un extremo, un tercio del diámetro de un cabello humano), alcanzando amplitudes pico a pico de 200 microradianes.

La mayoría de las lecturas del Espectrómetro de Correlación (COSPEC), para medir los valores del bióxido de azufre, entre el 13 y el 19 de diciembre, fueron mayores a las 50,000 ton/día. El 19 de diciembre, el valor reportado fue de cerca de 100,000 ton/día, en contraste con el promedio anual de 5,000 ton/día.

Para ilustrar la asombrosa intensidad de la liberación de la energía sísmica en este episodio de actividad, incluimos algunas gráficas de los promedios de las amplitudes sísmicas (RSAM) y algunos sismogramas. En cerca de 25 horas, de tremor armónico acumulado, la energía sísmica liberada por el volcán, excedió la de el resto del año 2000, y de hecho excedió la acumulada durante todo 1997, o de cualquier otro año para el que exista registro. Algunas de las gráficas de RSAM para dos estaciones durante los años de 1997 y 2000, muestran que la energía liberada en esas 25 horas de diciembre del 2000, excedieron por un factor de hasta 8 el total de la energía liberada en 1997, la cual había sido usada como referencia.



Los episodios de tranquilidad y de tremor armónico de baja frecuencia y gran amplitud, aparecieron de manera que podían ser interpretados con un modelo de carga y descarga (modelo de tiempo predictivo de Shimazaki y Nagata, 1980). De esta forma, el inicio del siguiente episodio importante de actividad (que fue el último, como se encontró después), del día 18 de diciembre, fue pronosticado con un día de anticipación.

Las fotografías aéreas especiales, tomadas el 16 de diciembre, permitieron observar el crecimiento de un domo dentro del cráter y correlacionar los episodios de tremor armónico de gran amplitud y baja frecuencia, con la emisión de lava a tasas muy altas. El análisis de las fotografías aéreas indican que el domo creció a una tasa promedio de entre 180 y 200 m³/s, durante los episodios de tremor armónico saturado. Esta tasa de crecimiento fue cerca de dos órdenes de magnitud mayor que cualquiera otra observada anteriormente.

Para estas fechas (15 y 16 de diciembre), la magnitud de las señales monitoreadas y la tasa tan alta de producción de lava que formó el domo más grande observado en el episodio actual de actividad del volcán Popocatepetl, motivó a las autoridades de Protección Civil a constituirse ese día en un comité de seguridad, y a declarar un

incremento en el nivel de alertamiento y la definición de radio de seguridad de 13 km. Este radio fue sugerido para incluir, al menos, a varias de las poblaciones más vulnerables, como Santiago Xalitzintla y San Pedro Benito Juárez. Santiago Xalitzintla está ubicado en una barranca que es uno de los principales drenajes de flanco Norte del Popocatepetl. San Pedro Benito Juárez se encuentra en una zona de fractura del flanco Sur-este, en donde se localizan muchos de los sismos volcano-tectónicos más grandes. San Pedro Benito Juárez es una población no muy bien comunicada, que se encuentra cerca de la rotura del labio del cráter conocida como “el chimuelo”, que se cree que se colapsó el 24 de febrero de 1664, durante una erupción similar a la presentada.



La evacuación preventiva de los habitantes de esos pueblos comenzó por la noche del 15 de diciembre y continuó temprano el día 16. La decisión de cuales poblados deberían ser evacuados fue tomada por las autoridades a nivel estatal y municipal. Esto causó que algunas poblaciones, fuera del radio de seguridad de 13 km, también fueran evacuadas por la decisión de los alcaldes. Cerca de 41,000 personas abandonaron el área; más o menos la mitad de ellos fueron movilizados por las autoridades de Protección Civil. De esta mitad, cerca de 14,000 aceptaron ser transportados a albergues, en donde se quedaron por hasta 10 días. Los otros pobladores se fueron con parientes o amigos.

El volumen total de lava fresca acumulada en el interior del cráter del volcán Popocatepetl, para el día 18 de diciembre, se estimó entre 15 y 19 millones de metros cúbicos. Este valor excede al de todos los volúmenes combinados de los domos anteriores (ver fotos). De hecho, el crecimiento vertical estimado para el domo fue tal que, otras 20 o 30 horas de tremor con la tasa de crecimiento mencionada, hubiera causado que la parte más alta del domo alcanzara el nivel mas bajo del borde del cráter, incrementando la probabilidad de un escenario que involucrara un desbordamiento del domo.

Como lo anticipó el antes descrito modelo, después de un período de tres días de relativa calma, el 18 de diciembre por la tarde, una nueva erupción comenzó. Las erupciones del 18 y 19 de diciembre, aunque con una relativa baja explosividad,

pero de duración larga, lanzaron grandes cantidades de fragmentos incandescentes en los flancos del volcán, en tres diferentes episodios. Se estima que los fragmentos lanzados alcanzaron distancias máximas de entre 5 y 6 km del cráter. Algunas imágenes de estas erupciones fueron muy realzadas por algunos medios de comunicación, quienes para ese entonces, habían instalado cámaras especiales alrededor del volcán y transmitieron imágenes en tiempo real. Después del día 19 de diciembre, la actividad bajó considerablemente y el siguiente período de actividad esperado para el día 23, con base en el modelo, no ocurrió, indicando que la tasa de suministro de magma había cambiado. Lo que se piensa que fue la primera explosión de destrucción del domo ocurrió el 24 de diciembre, lanzando fragmentos incandescentes a distancias de 2.5 km del volcán y produciendo una columna de ceniza de aproximadamente unos 5 km sobre el cráter. Cuando la naturaleza y tamaño del episodio quedaron bien establecidos al igual que los límites de la actividad futura esperada, se recomendó la reducción, del radio de seguridad a 12 km. No hay pueblos localizados dentro de este radio, y la gente pudo regresar a sus casas.



3.6 Conclusiones sobre la actividad de diciembre del 2000

La evaluación de estos eventos, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Esta fue la más grande erupción en términos de liberación de energía, registrada instrumentalmente en el Popocatepetl.
2. Afortunadamente, la erupción tuvo una explosividad relativamente baja.
3. Las decisiones fueron tomadas en una colaboración estrecha entre autoridades e investigadores.
4. La respuesta general del público, ante el manejo de la crisis fue buena, y la credibilidad hacia las autoridades e investigadores, mejoró.
5. La actividad del volcán no ha regresado a niveles como los anteriores a diciembre de 1994.

3.7 Año 2001, hasta Mayo 31

La actividad del volcán Popocatepetl, disminuyó considerablemente en enero, comparada con la actividad de diciembre del 2000. El siguiente evento importante ocurrió hasta el día 22 de enero del 2001; a las 14:58 h se presentó un sismo volcánico-tectónico de magnitud 2.8 localizado al este del cráter. A las 15:15 h inició una exhalación de vapor de agua que alcanzó 1 km de altura; luego, a las 16:15 h comenzó una exhalación grande de ceniza.

A las 16:23 h se incrementó la explosividad de esta emisión lanzando fragmentos y generando flujos de ceniza (piroclásticos) que descendieron por varias de las cañadas del volcán hasta distancias estimadas de 4 a 6 km, y flujos de lodo que descendieron hasta aproximadamente 15 km, quedando a 2 km de la población de Santiago Xalitzintla, Puebla. En este lugar, los flujos de lodo acarrearon bloques de hasta 0.5 m de diámetro y un ancho total del flujo de unos 7 m. A las 16:40 h la emisión de ceniza había alcanzado una altura de 8 km sobre el nivel del cráter.





Debido al poco viento, la columna de ceniza se elevó verticalmente, para luego precipitarse en las cercanías del volcán. Se reportó caída de ceniza en Santiago Xalitzintla. A este episodio se le considera un VEI = 2.

Las exhalaciones y explosiones que han ocurrido, desde el 24 de diciembre del 2000, no han removido una gran porción del domo. La estimación a esta fecha (7 de febrero del 2001), es que entre el 10-20% del volumen del nuevo domo, ha sido destruido por la actividad desde el 18 de diciembre del 2000. Debido a que en muchos de los episodios de construcción-destrucción del domo desde 1996, la masa del domo ha sido removida por explosiones de pequeñas a moderadas (índice de explosividad volcánica, $VEI \leq 2$), un escenario similar sería esperado en el futuro próximo.

No fue sino hasta el 29 y 30 de enero, que el volcán presentó otras exhalaciones con carácter explosivo que lanzaron pequeños fragmentos sobre la ladera oriental del volcán. El semáforo permaneció en enero en Amarillo fase 2 y el radio de seguridad en 12 km de distancia del cráter.



Desde la actividad del 22 de enero y hasta mediados del mes de mayo, la actividad que caracterizó al volcán Popocatepetl fue la siguiente:

- 69 tectono-volcánicos con magnitud < 3.0 ,
- 6 tectono-volcánicos con magnitud > 3.0 ,
- 233 h de tremor armónico,
- Secuencias sísmicas pulsantes,
- 8 explosiones confirmadas,
- 14 exhalaciones con columnas de ceniza,
- Un evento (explosión o exhalación) por semana en promedio.

Desde marzo se observó el crecimiento de pequeños domos de lava que han podido ser fotografiados en vuelos de la Dirección General de Carreteras Federales de la SCT. Estos pequeños domos, y su interacción con fuertes nevadas que se registraron en el volcán, provocó aumentos esporádicos de la actividad, que consistían en exhalaciones de vapor de agua continuas y episodios de tremor armónico de varias horas por día, pero de baja amplitud.

Durante estos meses, el semáforo de alerta volcánica se ha mantenido en Amarillo fase 3 y el radio de seguridad en 12 km.

A continuación se muestran fotografías representativas de la actividad del volcán en los últimos meses.





Un incremento de la actividad los días 9-10 y 15-16 de agosto, fueron relacionados con el crecimiento de un nuevo y pequeño domo en el interior del cráter. El 10 de agosto, el tamaño del domo fue de 190 m de diámetro por 30 de altura.

3.7 Conclusiones

- El volcán continúa en actividad (agosto de 2001), sin regresar a los valores anteriores a diciembre de 1994.
- Durante los 6.5 años de actividad del volcán, han sido numerosas las emisiones de ceniza, las cuales tuvieron trayectorias y elevaciones muy diversas, pero solo unas cuantas produjeron efectos importantes que afectaron las actividades rutinarias de la población.

- Las etapas eruptivas anteriores del Popocatepetl, han durado varios años, por ejemplo la de 1919-1928, es posible que la actual sólo se extienda por pocos años más y que el volcán entre de nuevo en una etapa de tranquilidad por decenas de años, como lo ha hecho en el pasado reciente. Por lo que es muy probable que para cuando se termine de construir el nuevo aeropuerto, Texcoco, Tizayuca o cualquier otro lugar cercano a la Cd. De México, el volcán Popocatepetl ya haya regresado a un periodo de tranquilidad, que podría durar mas de 50 años, como sucedió de 1928 a 1994, y lo que representaría la vida útil esperada de un aeropuerto.

4. LAS CENIZAS VOLCÁNICAS

Ana Lillian Martín Del Pozzo y Fabiola Mendiola

4.1 Distribución

En el período actual de emisiones del Popocatepetl, de diciembre 1994 a la fecha, la distribución de las cenizas ha sido fundamentalmente al este en el invierno y hacia el oeste en el verano. Esto es debido a que la dirección dominante de los vientos de mayo a septiembre es hacia el oeste y de octubre a abril es hacia el este. En las imágenes de satélite de diciembre 1994 y enero 1995 se pudo observar que la columna de ceniza llegó al Golfo de México. Durante este período se registraron lluvias de cenizas tanto al noreste, este como al sureste del volcán. En cambio, durante la primera semana de marzo 1996 cuando se reactivó el volcán después de varios meses de poca actividad, las imágenes mostraron una nube de ceniza de varios cientos de kilómetros distribuida mas hacia el sureste.

Las erupciones más grandes de este período han sido las del 30 de junio de 1997 y 22 de enero de 2001. La primera produjo lluvia de ceniza no sólo sobre la ciudad de México sino hasta Querétaro, mientras que la segunda produjo caída de ceniza sobre los estados de Puebla y Veracruz. La distribución más amplia está ligada a la mayor altura de la columna eruptiva o a la fuerza de los vientos dominantes.

Puebla, Cholula, Atlixco, Texmelucan, Tlaxcala, Amecameca, Ozumba, Tetela y otras poblaciones pequeñas en un radio de 40 km del volcán fueron frecuentemente alcanzadas por las nubes de cenizas aunque la ciudad de México, Cuautla, Cuernavaca, Texcoco, y poblaciones de Hidalgo también registraron pequeñas cantidades de ceniza en algunas de las erupciones. La mayor caída de ceniza se registró sobre el cono volcánico, aunque las lluvias de ceniza generalmente se distribuyeron en un radio de 100 km del volcán.

4.2 Registros de Caídas

En erupciones grandes pasadas, como las que ocurrieron hace 1000, 2000, 5000 y 14,000 años, acumulaciones de varios metros de ceniza y pómez de caída llegaron a los 15 km del volcán, mientras que espesores de 10 cm se reconocieron hasta los 100 km. En erupciones pequeñas como las actuales, estos espesores se reducen a milímetros.



En los registros históricos de La Colonia, e inclusive en los códices prehispánicos, se hace referencia al estado fumarolico del Popocatépetl (Cerro que Humea). Sin embargo, hace por lo menos 600 años se presenta un periodo de pequeñas erupciones cada siglo como mínimo. De especial importancia fueron las erupciones durante la conquista y las de del siglo XVII que provocaron oscuridad en la ciudad de Puebla.

Las erupciones de este nuevo periodo comenzaron el 21 de diciembre de 1994, provocando la caída de ceniza en la ciudad de Puebla, la que continuó durante varios días. Sin embargo los cambios en la dirección del viento provocaron la lluvia de ceniza también en Texmelucan, Tlaxcala, Cholula y Atlixco. Las emisiones de ceniza fluctuaron y disminuyeron a finales de enero. Sólo hubo caída de ceniza durante siete días de febrero a abril de 1995 y después se tuvo una relativa calma hasta el 5 de marzo cuando se reactivó nuevamente el volcán. Se registraron lluvias de ceniza de marzo hasta mayo y debido a los cambios en la dirección del viento la caída de ceniza se dispersó en todo el flanco este del volcán y poblaciones vecinas, pero cubriendo áreas al sur que no habían sido afectadas anteriormente. Sólo hubo tres erupciones que provocaron lluvia de ceniza hacia el noroeste en el resto de 1996, en octubre, noviembre y diciembre.

En 1997, los registros de ceniza fueron espaciados (tres días en marzo y cuatro en abril) pero a partir de mayo, el volumen de ceniza aumentó llegando a un máximo el 30 de junio, y con menor volumen el 4 de julio y 12 de agosto. En diciembre también se registró la caída de ceniza.

Durante 1998 se registraron lluvias de ceniza cada mes aunque hubo un marcado aumento en noviembre y diciembre. En enero 1999, continuaron las emisiones pero de menor magnitud; esta condición prevaleció durante casi todo 1999 y 2000. En octubre de 2000, aumentó la actividad pero no fue hasta diciembre que las emisiones fueron de importancia. También como resultado de esta alimentación

magmática se produjo la emisión de ceniza más importante de este periodo de emisiones, el 22 de enero, 2001.



4.3 Composición

Los análisis realizados en las cenizas del volcán Popocatepetl muestran que la mayoría está constituida por fragmentos de roca volcánica, tanto de los domos actuales como de rocas más antiguas. También contiene cristales de feldespatos y piroxenas, y en ocasiones de olivino o anfíbol, además de pequeñas cantidades de minerales accesorios. Muchos de estos cristales se encuentran en una matriz de cristales diminutos y vidrio. En algunas de las erupciones, la ceniza está compuesta de pómez, tanto clara como oscura, que refleja su diferente contenido en sílice y minerales ferromagnesianos. La composición de la ceniza es andesítica.

Las cenizas emanadas durante una erupción pueden atrapar parte del gas liberado en la columna eruptiva, razón por la cual se analizan lixiviados de las cenizas (“ceniza lavada”) del Popocatepetl. Las emanaciones gaseosas de los volcanes están constituidas en su mayoría por H_2O , SO_2 , CO_2 , H_2S , HCl y HF (agua, bióxido de azufre, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, respectivamente). El SO_2 puede reaccionar con el agua, formar ácido sulfúrico y depositarse sobre las partículas de ceniza; el HCl y el HF pueden cubrir dichas partículas. La concentración de estos iones y la relación entre ellos se ha asociado a diversos grados de contribución magmática, así como el estado de degasamiento del magma, ya que el SO_2 se emite antes que el HF y el HCl conforme el magma se acerca a la superficie (Stoiber y col., 1981 en: Martín Del Pozzo et al., 1995). Esta información puede utilizarse para elucidar si una erupción dada es magmática o si se trata de una erupción freática.

4.4 Origen y Formación

La ceniza de 1994, 1995 y principios de 1996 estuvo formada por rocas volcánicas pulverizadas de erupciones anteriores. Al abrirse camino, el nuevo magma expulsó el material que tapaba el conducto y en las emisiones de fin de marzo de 1996, la ceniza cambió. En este momento comenzó la formación de varios domos de lava, que continúa hasta la fecha. Entre cada periodo de crecimiento y enfriamiento-contracción de estos domos formados por magma nuevo, también se produjo su destrucción parcial por explosión. Las cenizas de estas erupciones están formadas principalmente por fragmentos de estos domos. En algunas de las erupciones, generalmente las más grandes, también se produjo ceniza formada por gotas de magma. Este material refleja que el magma es más bien una mezcla de material profundo que sube y entra en contacto con magma más evolucionado con un mayor contenido de sílice.



4.5 Dinámica de las Cenizas

Los depósitos de caída o cenizas representan uno de los fenómenos volcánicos que causan mayor impacto dentro de la actividad humana por su alta capacidad de distribución lo que le permite alcanzar grandes distancias, afectando un gran número de las poblaciones aledañas al volcán Popocatepetl.

Las cenizas están constituidas por fragmentos de roca pulverizada o gotas de magma que han sido expulsados hacia la atmósfera durante una erupción y que son arrastrados hacia arriba por la columna eruptiva y los gases; posteriormente cuando la fuerza de empuje es menor que la fuerza de gravedad, caen de regreso hacia la superficie de la tierra. La altura de la columna eruptiva está determinada por la temperatura del material y por la tasa de emisión del mismo, las cuales junto con la dirección y fuerza del viento son los factores que controlan el transporte y dispersión de las cenizas (Blong, 1984; Scott, 1993; Francis, 1995).

Las caídas de cenizas del Popocatépetl producen depósitos discontinuos que cubren, en forma amplia, la topografía. En el caso de las erupciones recientes del Popocatépetl (1994 a la fecha), la mayor parte de los espesores de ceniza son menores a un milímetro aunque sobre el flanco del volcán, se han registrado espesores de centímetros para erupciones mayores. El análisis de los productos de caída permite estudiar la composición del magma, así como la dinámica eruptiva. Esta información también es necesaria para entender el sistema de alimentación volcánica (Rosi, 1996).

Las cenizas varían de tamaño desde ceniza (<2 mm), a lapilli (2-64 mm), hasta bloques y bombas (>64mm) que pueden alcanzar un diámetro de hasta algunos metros (Fisher, 1966; Fisher y Schmincke, 1984). Desde 1994, el Popocatépetl ha presentado numerosas erupciones pequeñas que han producido la lluvia de ceniza y lapilli en las poblaciones cercanas.

En las grandes erupciones, la columna eruptiva puede alcanzar alturas de hasta 55 km, aunque lo común es de 3 a 10 km. La velocidad con que el viento transporta las cenizas varía de <10 a <100 km/h. Los depósitos pueden extenderse miles de kilómetros en la dirección del viento, aunque los depósitos resultantes son muy delgados a distancia. El material de <64 mm alcanza su equilibrio térmico al introducirse en la atmósfera, aunque las pómez pueden estar por encima de la temperatura de ignición hasta 30 km de altura. Las lluvias de ceniza pueden ser tan densas que pueden bloquear la luz, provocando una visibilidad de casi cero durante varias horas. La ceniza se compacta cerca de la mitad de su espesor original en algunos días, especialmente si esta húmeda; su densidad de compactación puede ser de 16 t/m³ o más alto. La ceniza es altamente abrasiva cuando es arrastrada por el viento, principalmente si está compuesta de partículas de vidrio. La ceniza es magnética y altamente conductiva cuando esta húmeda y se funde a temperaturas entre 900 y 1000°C (Blong, 1996).

Al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, la ceniza presenta una disminución en el tamaño de los granos y forma depósitos más delgados. Sin embargo, en algunas erupciones históricas se ha observado que el espesor de capas de ceniza aumenta por la acreción de las partículas (Carey y Sigurdsson, 1982; Brazier et al. 1983; Carey, 1996).

Para conocer las características de las cenizas, se deben realizar constantemente muestreos. En cada estación de muestreo se mide el espesor acumulado, y el espesor total en un área de control ubicada al lado del área de muestreo. Después

se recoge la ceniza acumulada con un cepillo fino en bolsas de plástico que son selladas para ser analizadas.

Los mapas de distribución pueden ser modificados según la caída de ceniza después de cada viaje de muestreo, para poder obtener una secuencia temporal del volumen total del material emitido (Martín Del Pozzo *et al.*, 1995).

En las cercanías del volcán la ceniza fría o caliente puede dañar el aparato respiratorio. El peso de los depósitos de ceniza y pómez pueden provocar el colapso de los techos de las construcciones y romper las líneas de electricidad y teléfonos. La ceniza puede destruir la vegetación y las tierras de pastura, pueden desgastar la dentadura del ganado y su ingestión puede causar daños a la salud. La ceniza en la atmósfera reduce y hasta oscurece la visibilidad, afectando el **tráfico aéreo**, de ferrocarriles y caminos. La ceniza afecta los motores, tapando los filtros y desgastando las partes móviles. Pueden arrastrar ácidos que corroen los metales y dañan o matan cultivos. También pueden obstruir canales y drenaje, la ceniza fina infiltrarse y causar cortocircuitos, en las líneas de abasto, así como en transformadores y aparatos electrónicos. La ceniza también puede contaminar depósitos de agua no protegidos y tapar filtros y sistemas de aire y calefacción (Crandell *et al.* 1984).

Los depósitos de caída mojados o húmedos son más peligrosos que los secos porque son mucho más pesados. Un depósito de ceniza y lapilli seco de 10 cm, puede pesar entre 20 y 100 kg/m², mientras que una capa del mismo espesor húmeda puede pesar 50-150 kg/m². La diferencia de peso es significativa cuando se acumula sobre el techo de una construcción. También la ceniza húmeda es mucho más cohesiva, lo cual causa que se adhiera con mayor facilidad a los cables eléctricos, a las líneas del teléfono y los techos de las construcciones, además interfiere con el movimiento de los pies y las ruedas de los vehículos. La ceniza dispersada sobre una cuenca hidrográfica, puede inducir cambios importantes en las relaciones precipitación/escurrimiento. Depósitos de ceniza fina con una baja permeabilidad en temporadas de lluvias llevan a un incremento en el escurrimiento, a una erosión acelerada, inundaciones, corrientes de lodo y ajustes en los canales de los ríos. A diferencia, los grandes depósitos de ceniza de grano grueso pueden incrementar la capacidad de infiltración y prácticamente eliminar el escurrimiento (Blong, 1984; Crandell *et al.*, 1984; Scott, 1993).

El peligro puede continuar por meses y aún años después de la erupción, con la formación de lahares secundarios debidos a laderas cubiertas de ceniza y lapilli, así como materiales volcánicos no consolidados que son particularmente propensos a una removilización posterior. Los depósitos de ceniza fina en especial favorecen el desarrollo de lahares secundarios debido a: una reducción substancial de la infiltración del agua (y por lo tanto un incremento en el escurrimiento); así como la generación de torrentes ricos en material fino con una alta capacidad de transporte (Rosi, 1996).

4.6 Conclusiones

En erupciones grandes pasadas, espesores de 10 cm de ceniza de caída se encontraron hasta 100 km de distancia, mientras que en erupciones pequeñas como las actuales, estos espesores se reducen a milímetros. La mayor parte de la ceniza gruesa cae sobre el cono y la fina en un radio de 100 km. Las cenizas actuales del volcán Popocatépetl son rocas volcánicas pulverizadas compuestas principalmente de fragmentos de los domos, algunos cristales y en pocas ocasiones pómez. La composición es andesítica.

Si se requiere una evaluación más específica sería necesario llevar a cabo un estudio de campo y laboratorio más detallado, de mapeo y muestreo con control estratigráfico para definir las características específicas de un sitio definido.

Referencias

- Blong, J.R. 1984. Volcanic Hazards. Academic Press. Australia. 424 p.
- Blong, J.R, 1996. "Volcanic Hazards Risk Assessment." In Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. Ed. by Scarpa y Tilling. Springer-Verlag Berlin. p. 675-698.
- Brazier S., R.S.J. Sparks, S.N.Carey, H. Sigurdsson y J.A. Westgate. 1983. "Bimodal grain size distribution and secondary thickening in air fall ash layers." *Nature*. 301:115-119.
- Carey, S.N. 1996. Modelling of tephra fallout from explosive eruptions." In Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. Ed. by Scarpa y Tilling. Springer-Verlag Berlin. p. 429-461.
- Carey S. y H. Sigurdsson. 1982. "The 1982 eruptions of El Chichón volcano Mexico (2) Observations and numerical modelling of tephra-fall distribution." *Buul. Vulcanol.* 48(2/3): 127-142.
- Crandell D.R., B. Booth, K. Kusumadinata, D. D. Shimozuru, G.PL. Walker y - D.Westercamp. 1984. Source-book for volcanic zonation. UNESCO. New York. 97 p.
- Fisher, R.V. 1966. "Rocks composed of volcanic fragments and their classification". *Earth-Science Review*. 1: 287-298.
- Fisher, R.V. and U. Schmincke. 1984. Pyroclastic Rocks. Springer-Verlang. Germany. 472 p.
- Francis, P.W. 1995. Volcanoes. A planetary perspective. Oxford University Press. New York.

Martin del Pozo A.L., M.F. Sheridan, D. Barrera, J. Lugo-Hubp, L. Vázquez-Selem. 1995a. Mapa de Peligros del Volcán de Colima. Instituto de Geofísica UNAM. México. Escala 1:70,000.

Martin del Pozo A.L., M. Sheridan, D. Barrera, J. Lugo-Hubp, L. Vazquez-Selem. 1995b. "Potential hazards from Colima Volcano, Mexico". *Geofísica Internacional*. 34(4): 363-373.

Martin del Pozo A.L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M. A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Lugo-Hubp, J., González, V., Butrón, M. A., Villarreal, M. 1995 "La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el volcán Popocatépetl". CENAPRED, UNAM: 285-294.

Rosi, M. 1996. "Quantitative reconstruction of recent volcanic activity: A contribution to forecasting of future eruptions." In Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. Ed. by Scarpa y Tilling. Springer-Verlag Berlin p. 631-674.

Scott, W.E. 1993(a). " Los Peligros Volcánicos." Los Peligros Volcánicos. Apuntes para un curso breve sobre Peligros Volcánicos. Tilling, R.I. Ed., B. Beate. Trad Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos. Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra. *WOVO. IAVCEI* p. 9-24.

5 PATRONES DE VIENTO EN LAS CERCANÍAS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL, LOS PRODUCTOS BALÍSTICOS Y SUS EFECTOS

Hugo Delgado Granados

5.1 Introducción

A medida que el país avanza, pareciera incrementarse la amenaza que representan los fenómenos naturales tales como los sismos y las erupciones volcánicas. Tenemos la impresión en ocasiones, que el mundo se volviera cada día más peligroso desde el punto de vista de los procesos naturales ante la frecuente ocurrencia de los desastres naturales, a pesar de los adelantos científicos y tecnológicos. Nada más alejado de la realidad.

Los “desastres naturales” no son en realidad naturales, su ocurrencia es en realidad una consecuencia de la ocupación cada vez más importante de los espacios naturales por el hombre. Si el hombre no ampliara sus áreas de acción, los desastres no ocurrirían. Al extenderse las manchas urbanas e industriales, la exposición del hombre a los fenómenos naturales es cada día mayor.

Al ocupar el hombre espacios cada vez más cercanos a los volcanes, se vuelve más vulnerable ante los efectos de su actividad. La actividad eruptiva de pequeña magnitud incluso, puede tener efectos importantes sobre la vida humana y sus posesiones, así como la vida económica y social de quienes viven en sus cercanías.

La planeación urbana debe procurar un balance entre la extensión de las zonas habitacionales, industriales y zonas de infraestructura vitales, con el alcance probable de los productos volcánicos para mitigar sus efectos, o bien, desarrollar e implementar programas de contingencia con un conocimiento fundamentado y detallado de los volcanes y sus efectos.

En particular, la planeación necesaria para ubicar el Aeropuerto Alterno de la Ciudad de México debe contemplar la presencia de los vientos dominantes en la región para reconocer las posibilidades de que las contingencias volcánicas obliguen al cierre del aeropuerto y la paralización de sus actividades debido a la actividad eruptiva del Popocatépetl, toda vez que la actividad eruptiva explosiva no es fácil de pronosticar en el corto y mediano plazo. Es de tomar en cuenta que el área de influencia de las nubes de cenizas del Popocatépetl es muy grande (Figura 1), pero es necesario entender las condiciones de dispersión de las cenizas

de acuerdo con la importancia de la actividad eruptiva y la época en que ésta pueda darse.

Este trabajo es una revisión general de los procesos volcánicos que producen partículas fragmentadas (productos balísticos y cenizas), así como los patrones de viento en la región central de México, con el fin de reconocer los peligros asociados con la lluvia de cenizas en esta zona y comprender las posibles trayectorias de productos balísticos y nubes de cenizas de acuerdo con los alcances verticales de las columnas eruptivas y en función de los vientos dominantes por época y nivel atmosférico.

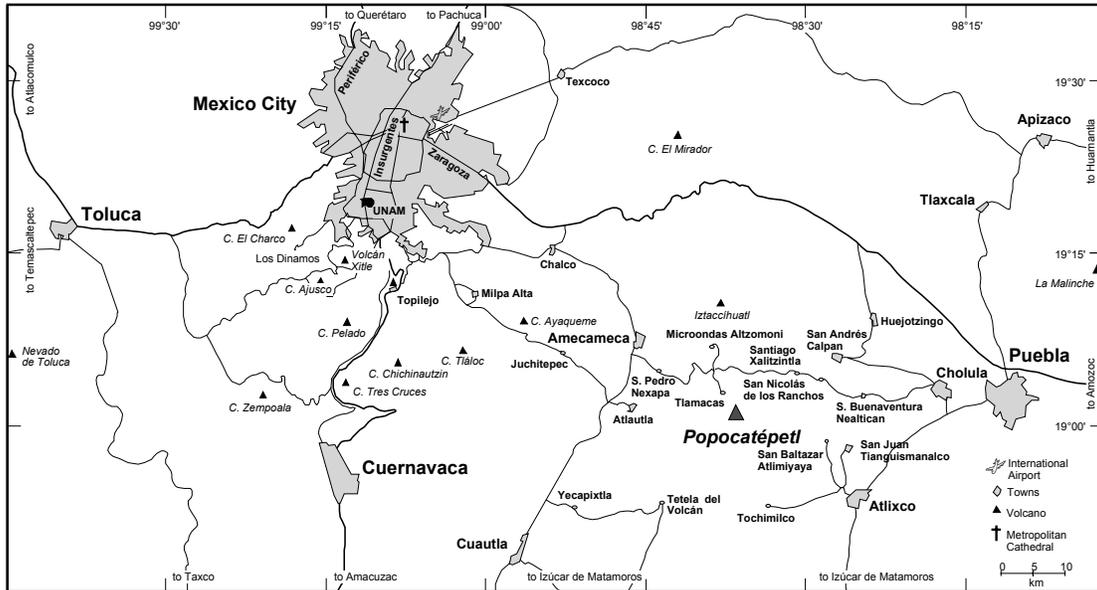


Figura 1. Mapa de localización del volcán Popocatepetl y principales centros de población.

5.2 Columnas Eruptivas y Nubes de Cenizas

Volcanes como el Popocatepetl pueden hacer erupción en forma explosiva. En estos casos, los gases volcánicos que se encuentran contenidos dentro de los magmas que alimentan a los volcanes, se separan de la fase líquida formando una serie de burbujas que coalescen para formar burbujas más grandes. Las presiones de las regiones donde estos procesos de separación de fases ocurren, son muy altas, razón por la que al ascender hacia niveles más someros dentro de la corteza, o sea, al acercarse hacia la superficie, los gases se expanden debido a una disminución en la presión. Cuando los gases se expanden de manera rápida por cambios drásticos en la presión, se da un cambio de volumen tan repentino y violento que rompe y fragmenta a las rocas que contienen a dichos gases.

Este proceso de fragmentación da lugar a los llamados piroclastos o tefras, que pueden tener un rango muy amplio de tamaño. Los fragmentos mayores a 6.4 cm se les denomina bombas y generalmente siguen trayectorias balísticas, parecidas a las trayectorias parabólicas. Los fragmentos entre 6.4 y 0.2 cm se conocen técnicamente como lapilli y pueden seguir trayectorias cercanamente parabólicas (las más grandes), pero algunas pueden levantarse e integrar parte de la columna eruptiva hasta que su peso y la ausencia de factores que permitan sostenerse en el aire hagan que se precipiten a tierra, cayendo cerca del cráter o fuente de los productos volcánicos (Figura 2).

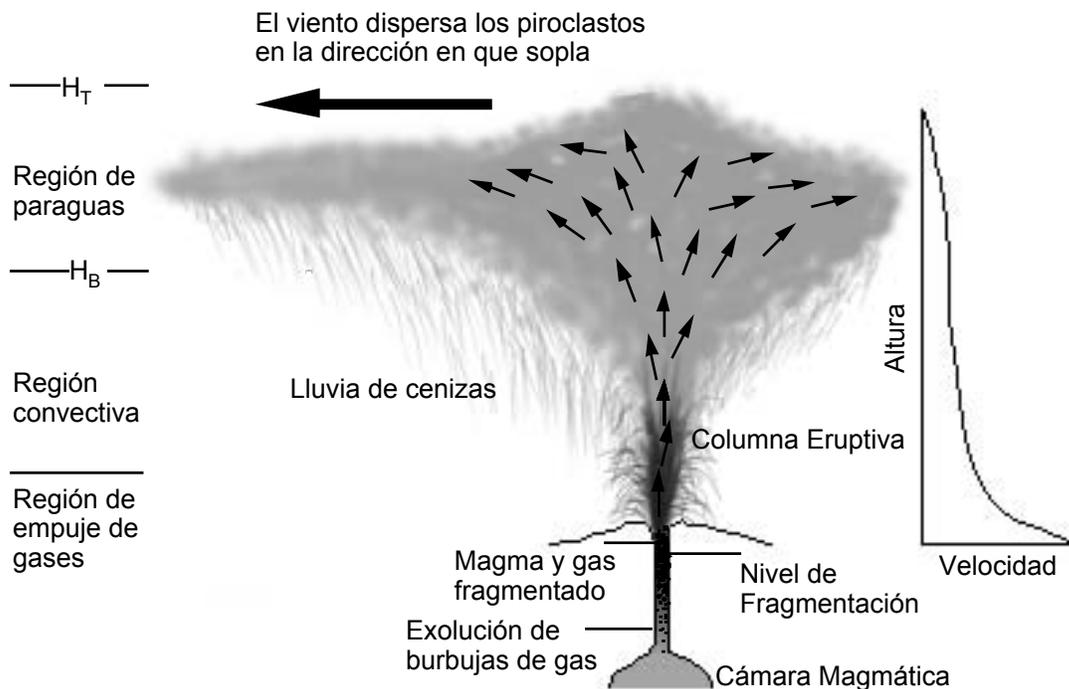


Figura 2. Características principales de una columna eruptiva. La convección hace que las partículas lleguen hasta la altura H_B ; el desplazamiento lateral se lleva a cabo arriba de H_B , con el material moviéndose hacia afuera radialmente. El momentum de las partículas hace que algunas de éstas lleguen hasta la altura H_T . Los vientos posteriormente, flexionan la columna en la dirección en que soplan y transportan las cenizas distribuyéndolas de acuerdo a su velocidad, densidad y volúmen del material (Modificado de Sparks, 1986; Carey y Sparks, 1986; y Wilson, 1980).

Las cenizas volcánicas son los fragmentos con tamaños menores a 2 mm y generalmente se elevan de forma vertical para constituir una columna eruptiva que se eleva a altitudes variables dependiendo fundamentalmente de la tasa de aporte de material fragmentado. No obstante, el contraste de temperaturas entre el material volcánico inyectado a la atmósfera y la temperatura de ésta a altitudes como las de la cumbre del volcán Popocatépetl, donde las temperaturas comúnmente son menores a 0°C, permiten que en ocasiones, las columnas eruptivas alcancen altitudes de varios kilómetros por arriba de la cima sin necesidad de una alta tasa eruptiva. Al equilibrarse las temperaturas de las cenizas volcánicas y los gases que les ayudan a sostenerse en el aire, la columna se expande para formar un hongo o paraguas, antes de que las cenizas más grandes se precipiten debido a su peso (las partículas más grandes de hecho, caen mientras el resto se elevan hasta la zona de paraguas) (Fotografía 1). En esta región, los vientos actúan sobre las cenizas más finas y las transportan en la dirección en que soplan con una velocidad de acuerdo a la intensidad del viento. Así se forma una nube de cenizas que puede viajar por varios kilómetros e incluso por miles de kilómetros, como ocurrió por ejemplo en diciembre de 1994 al inicio de la erupción del Popocatépetl.



Fotografía 1. Columna eruptiva del volcán Popocatépetl del 4 de noviembre de 1996. Se observa el crecimiento de la columna eruptiva describiendo la región de empuje de gases y la convectiva. La región de paraguas apenas se forma al alcanzar el nivel máximo de flotación de la columna, antes de formar una nube de cenizas bajo la acción de los vientos prevalecientes en esa región. Parte de la columna se colapsa en la región convectiva y las cenizas comienzan a precipitarse al terreno.

5.3 Los Productos Balísticos

Los productos balísticos no son arrastrados por el viento, pero es oportuno mencionar algunos aspectos importantes de sus características y efectos en la aeronavegación.

Durante las explosiones volcánicas los proyectiles balísticos son expulsados del cráter con velocidades que pueden rebasar los 1,000 km/h, lo que les permite recorrer algunos kilómetros de distancia en menos de un minuto. La trayectoria parabólica que describen estos productos antes de caer en la superficie de la tierra es modificada por la fuerza de arrastre del aire, la cual disminuye considerablemente el alcance y provoca que la caída de los balísticos sea más vertical de la que sería en un movimiento parabólico (Fotografía 2).



Fotografía 2. Explosiones volcánicas ocurridas en el volcán Popocatepetl el 21 de diciembre del 2000. Se observan las trayectorias seguidas por los productos balísticos, pero no se observa la columna eruptiva debido a la oscuridad y a la menor temperatura de los productos que la componen.

El evento ocurrido en el volcán Popocatepetl el 30 de junio de 1997 representa una de las explosiones más grandes ocurridas durante la erupción actual. El evento lanzó fragmentos de pómez de hasta 10 cm de diámetro en Paso de Cortés, partículas del tamaño de la arena en Amecameca y cenizas más finas en la Ciudad de México. En noviembre y diciembre de 1998 ocurrieron también diferentes eventos explosivos que produjeron proyectiles balísticos incandescentes que alcanzaron una distancia máxima de 3.7 km respecto al cráter.

El alcance de los proyectiles balísticos depende de la magnitud de la explosión que les dio origen, aunque difícilmente tienen un alcance superior a 10 km. Las velocidades típicas de impacto van desde 300 hasta 500 km/h. Esto implica por ejemplo, que un balístico de 31 cm de diámetro que cae a una velocidad de 500 km/hr tiene una energía de impacto igual a la del choque de un automóvil de una tonelada moviéndose a 100 km/h.

El peligro volcánico es la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo dado de tiempo. El Mapa de Peligros por Caída de Productos Balísticos del Volcán Popocatepetl publicado por el Instituto de Geofísica de la UNAM conjuntamente con el CENAPRED (Alatorre et al., 2001), presenta las áreas máximas aproximadas que pueden ser alcanzadas por los proyectiles balísticos lanzados por el volcán Popocatepetl de acuerdo a diferentes escenarios explosivos que están basados en observaciones de la erupción actual y eventos históricos del volcán.

Para determinar los máximos alcances posibles se elaboró un modelo matemático que describe la trayectoria de los productos balísticos considerando la fuerza de la gravedad y la fuerza de arrastre del aire. Con dicho modelo se calcula el ángulo de lanzamiento del proyectil con el que se obtiene su máximo alcance. Durante el procesamiento de la información se encontró que existe un rango óptimo de tamaño de los fragmentos, el cual depende de la magnitud de la explosión y con el cual, los balísticos logran un mayor alcance. Esto es debido a que los fragmentos de dimensiones mayores y menores a este rango óptimo resienten más las fuerzas (Figura 3) permiten tener una percepción espacial del área que puede ser afectada por la caída probable de balísticos. En el caso más probable y por tanto de mayor fuerzas gravitatoria y de arrastre respectivamente, y como consecuencia de ello su alcance es menor.

De esta manera, los tres escenarios plasmados en el mapa (Figura 3) permiten tener una percepción espacial del área que puede ser afectada por la caída probable de balísticos. En el caso más probable y por tanto de mayor peligro, el área de afectación se señala en color rojo. En el caso menos probable y por tanto de menor peligro, correspondiente a los eventos explosivos plinianos, el alcance es mayor y el área de afectación se muestra en color amarillo. En este caso, se incluyen diversas poblaciones dentro de esta área. La zona de peligrosidad intermedia se muestra en color naranja.

De esta manera, los tres escenarios plasmados en un mapa (peligro, el área de afectación se señala en color rojo. En el caso menos probable y por tanto de menor peligro, correspondiente a los eventos explosivos plinianos, el alcance es mayor y el área de afectación se muestra en color amarillo. En este caso, se incluyen diversas poblaciones dentro de esta área. La zona de peligrosidad intermedia se muestra en color naranja.

Las altitudes calculadas para el alcance de los productos balísticos del volcán Popocatepetl, de acuerdo con las observaciones hechas durante la presente erupción y tomando en cuenta rasgos de erupciones pasadas que pueden ser utilizadas para estimar la altura máxima sobre el cráter, así como el alcance

máximo que podrían tener tales productos, han permitido saber que las aeronaves no deben sobrevolar el cráter del Popocatepetl en una altura menor a 8 km por encima del mismo

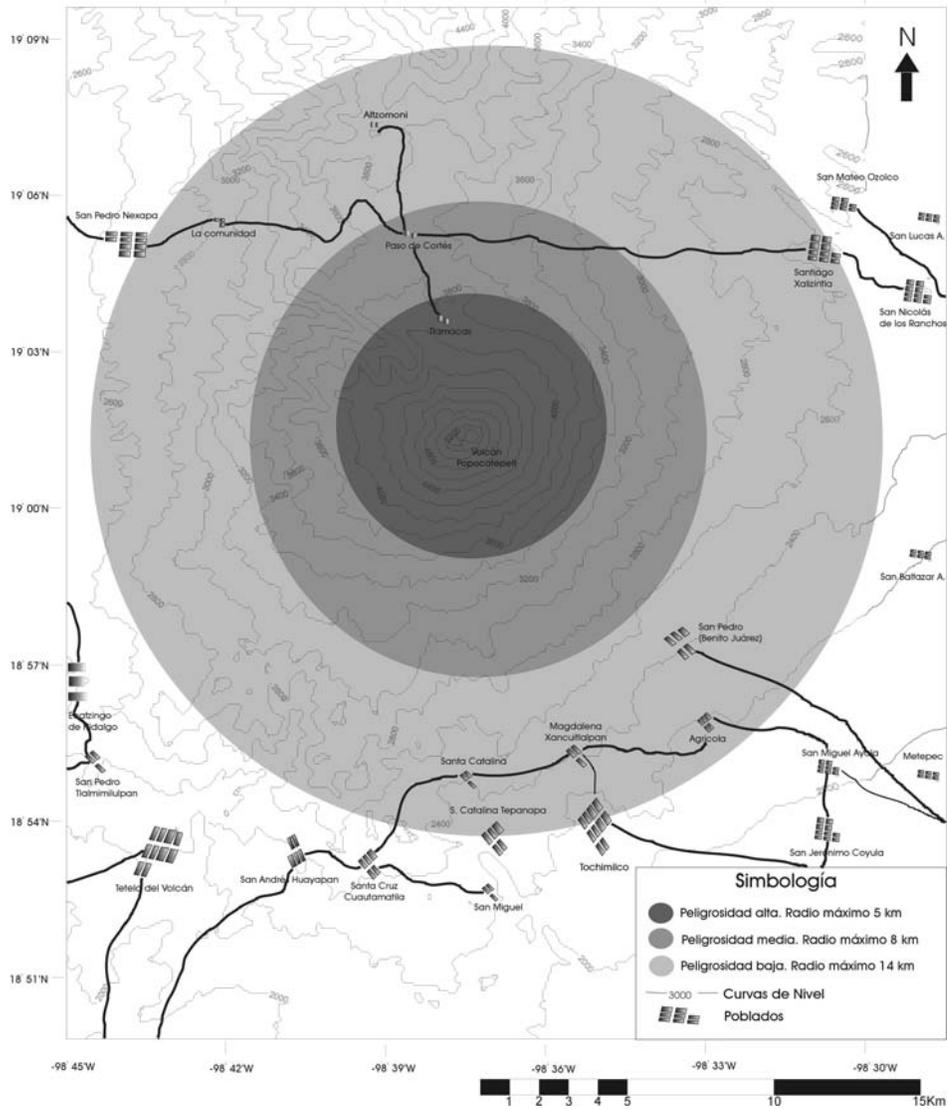


Figura 3. Mapa de peligros por productos balísticos utilizando las condiciones de máximo alcance y considerando un viento favorable para obtener la distancia máxima que pueden alcanzar los proyectiles balísticos en tres escenarios explosivos posibles en el volcán Popocatepetl: el de la erupción actual (el más común), el de una erupción de magnitud intermedia (subpliniana) y el de una erupción de gran magnitud (pliniana), todos documentados con base en erupciones pasadas de diferentes magnitudes del Popocatepetl para obtener resultados realistas. En cada cálculo se consideró la topografía del volcán, así como las restricciones que impone el cráter al ángulo de salida. En función de lo anterior, el alcance varía según el sector hacia donde se dirija la explosión, sin embargo, el alcance máximo calculado para la zona de mayor peligro (escenario de magnitud similar a la erupción actual) es de 5 km, mientras que el de la zona de peligrosidad intermedia (escenario de erupción subpliniana) es de 8 km y el alcance de la zona de peligrosidad baja (escenario de erupción pliniana) es de 14 km a partir del cráter.

5.4 La Actividad Explosiva del Volcán Popocatépetl

El *índice de explosividad volcánica* (VEI por sus siglas en inglés) ha permitido caracterizar las erupciones volcánicas que ocurren en el mundo (Tabla 1). La tabla del VEI es usada como una referencia fundamental de clasificación de erupciones volcánicas, particularmente erupciones pasadas, pero poco ayuda para caracterizar erupciones que se encuentran en proceso, ya que muchas veces no es posible tener una estimación de los volúmenes de material emitido durante una erupción. Por esta razón, se utiliza como criterio de clasificación la altitud alcanzada por las columnas eruptivas.

No obstante, la altura de las columnas eruptivas puede no corresponder al VEI que indica la tabla, en particular durante las erupciones vulcanianas.

La actividad explosiva del volcán Popocatépetl es de carácter vulcaniano alternado con episodios de actividad efusiva. Evidencias del carácter vulcaniano son las grandes emisiones de gases reportados durante los últimos 6 años, que han establecido nuevos récords de emisión de gases medidas en volcanes activos del mundo.

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción de la erupción	no explosiva	pequeña	moderada	moderada-grande	grande	muy grande	_____		
Volúmen de piroclastos (m ³)	<10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁹	10 ⁹ -10 ¹⁰	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ¹¹ -10 ¹²	>10 ¹²
Altura de la columna (km) ^a	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	_____		
Clasificación	_____ Estromboliana _____		_____ Vulcaniana _____			_____ Pliniana _____			
	_____ Hawaiiiana _____		_____ Ultra-Pliniana _____				_____		
Duración (horas de explosiones continuas)	_____ <1 _____		_____ 1-6 _____			_____ >12 _____			
	_____		_____ 6-12 _____			_____			
Inyección a la Tropósfera	despreciable	menor	moderada	substantial	_____				
Inyección a la Estratósfera	no	no	no	posible	definitiva	significativa	_____		
Erupciones ^b	443	361	3108	720	131	35	16	1	0

^a para VEI 0 - 2, la altura está dada en km sobre el borde del cráter, para VEI 3 - 8, la altura está dada en km sobre el nivel del mar

^b número de erupciones totales en el catálogo de volcanes activos.

Tabla 1. Índice de Explosividad Volcánica. Esquema de clasificación de Newhall y Self (19082). El catálogo de volcanes activos que se menciona es el de Simkin et al. (1981).

Esta actividad explosiva vulcaniana se caracteriza por los bajos volúmenes de material piroclástico eyectado. Esto ha venido a reflejarse en la densidad de las nubes de cenizas producidas hasta el momento. A pesar de que la mayoría de las nubes eruptivas son espectaculares por alcanzar grandes altitudes, la mayoría de estas columnas eruptivas y las nubes de cenizas asociadas poseen una baja densidad de material piroclásticos que se traduce en la deposición de capas de ceniza en las zonas circunvecinas al volcán de muy pequeño espesor.

La razón por la que las columnas alcanzan grandes altitudes, es que la fuente de los materiales incandescentes es muy alta (superior a 5,400 metros de altitud) y las condiciones atmosféricas en esta región contrastan fuertemente con las condiciones físicas de salida del material y los gases mezclados en la columna eruptiva. Particularmente espectaculares resultan las columnas eruptivas formadas durante el invierno y parte del otoño y primavera, cuando la temperatura del aire es menor a los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las cercanías del cráter (menor aún durante la noche) y más bajas todavía en los estratos atmosféricos superiores, llegando a ser menores a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los 10,000 metros de altitud. Adicionalmente a estas condiciones es importante considerar la baja cantidad de humedad en estas épocas. El contraste de un ambiente seco con una nube rica en volátiles y sobre todo de vapor de agua puede elevarse considerablemente y en poco tiempo en la época invernal. Ejemplos de este tipo de columnas lo son las producidas en noviembre de 1998 y las de diciembre del año 2000.

No obstante, algunas columnas eruptivas alcanzan grandes altitudes debido a proporciones mayores de material volcánico, como fue el caso del evento del 22 de enero del año 2001, cuando la columna alcanzó cerca de 20 kilómetros de altitud, aunque el hecho de que el evento ocurriera durante la época invernal propició que la columna se elevara tan alto y tan rápidamente. Evidencia de una mayor abundancia de material piroclástico durante este evento, es la observación de flujos piroclásticos densos que descendieron por el flanco norte al colapsarse parte de la columna eruptiva.

De acuerdo con la altitud que alcanzan las diferentes columnas eruptivas, las nubes de cenizas resultantes se moverán en la dirección hacia donde sopla el viento en el nivel de la región de paraguas, la cual depende de la época del año.

Es importante señalar que aún cuando la actividad explosiva del Popocatepetl durante la actual erupción es de carácter vulcaniano, el pasado geológico revela que este volcán ha producido columnas eruptivas plinianas, es decir, columnas eruptivas correspondientes a procesos en los que están involucradas enormes cantidades de magma (más de 10^7 m^3 de magma) y gases volcánicos. Por esta razón, es necesaria la vigilancia continua de la actividad eruptiva y el diseño de medidas de prevención ante la eventualidad de eventos sub-plinianos y plinianos.

5.5 Los Vientos en la Vecindad del Volcán Popocatepetl

En este trabajo se muestran datos de viento obtenidos en la estación de radiosondas, localizada en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para los años 1976 a 1982 y de 1990 a 1994. Esta información fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional de la siguiente manera: los sondeos de los primeros años (1976-1982) fueron proporcionados en forma de listado, indicando por una parte los niveles equipotenciales en milibares (mb) y por otra parte, la dirección y velocidad del viento; en los sondeos de 1990, 1991 y parte de 1992 (enero-marzo), los datos se encuentran dispuestos en forma codificada (mensaje tipo TEMP) en tanto que el resto de la información (1992-1994) se encuentra de en código ASCII. Para acceder los datos codificados se uso un programa de

computadora en lenguaje Fortran diseñado por personal del Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (M.en C. Ismael Pérez García).

Para el análisis estadístico, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

- a) Parte de la información (1976-1982) se agrupó en “vientos bajos” y “vientos altos” para distinguir las variaciones en dirección de viento debajo y arriba de la cima del volcán Popocatepetl tomando como cota de separación los 550 mb (para vientos bajos) y 500 mb (para vientos altos), es decir aproximadamente a los 5,500 metros sobre el nivel del mar (a partir de este momento m). Se construyeron rosetas (histogramas circulares) mensuales, donde cada barra apunta en la dirección de procedencia del viento, indicando los porcentajes de frecuencia para cada dirección de viento (Figura 4 y 5). Aún cuando en meteorología se usan frecuentemente las cotas en mb, en este trabajo por razones prácticas se anotan las cotas aproximadas en metros sobre el nivel del mar.
- b) Esta misma información se agrupó en ocho estratos. A saber: vientos en la zona de más de 750 mb (aproximadamente menos de 3,000 m), entre 750 y 550 mb (~3,000 a 5,800 m), entre 550 y 400 mb (~5,800 a 7,600 m), entre 400 y 300 mb (~7,600 a 9,500 m), entre 300 y 200 mb (~9,500 a 12,400 m), entre 200 y 100 mb (~12,400 a 16,000 m), entre 100 y 50 mb (~16,500 a 20,600 m) y menos de 50 mb (aproximadamente más de 20,600 m)(Figuras 6A, 6B, 6C y 6D). Esta agrupación se hizo con el fin de estudiar los diferentes patrones de viento por estrato, mencionando las direcciones preferenciales, así como las velocidades de viento más abundantes en por ciento, dispuestas en orden vertical, para visualizar su distribución vertical. Las velocidades de viento se dan en metros por segundo (1 m/s = 1.92 nudos).
- c) La información de 1990-1994 fue ordenada y procesada estadísticamente para obtener los datos de algunos niveles representativos de la atmósfera superior, para determinar las variaciones espacio-temporales que caracterizan el comportamiento del viento en la atmósfera superior de la región. Los resultados se agruparon y graficaron en niveles representativos (500, 250, 100, 50, 30 y 20 mb, que corresponden aproximadamente a 5,850, 10,900, 16,500, 20,600, 23,700 y 26,300 m) para cada mes del año. Este análisis se inició a partir de los 500 mb, considerando la altitud del volcán, a fin de evitar la posible influencia de la topografía en el comportamiento de los vientos (Figuras 7A, 7B, 7C y 7D).
- d) Con base en la información de vientos entre México y Veracruz para el año de 1993, el Servicio Meteorológico Nacional realizó un corte transversal de vientos mensual entre ambas ciudades, con el fin de mostrar los patrones de viento entre ellas, a través de las montañas a diferentes niveles (Figura 8).

5.6 Comportamiento de los Vientos en la Región

La Figura 4 muestra los vientos a altitudes menores a los 5,500 m aproximadamente, de enero a diciembre. Las rosetas de esta figura muestran que los vientos en esta parte son prácticamente aleatorios, aunque existen patrones de

viento incipientes: uno es persistentemente del oeste ($250^{\circ}\sim 300^{\circ}$) de enero a abril y en el otro, de junio hasta diciembre, los vientos provienen predominantemente del noreste ($20^{\circ}\sim 60^{\circ}$), aunque en noviembre y diciembre vuelven a aparecer los vientos provenientes del suroeste y del oeste. Entonces, los vientos soplan del oeste de enero a abril y del noreste de junio a octubre. Mayo, noviembre y diciembre son los meses con mayor dispersión de vientos.

Los vientos que soplan arriba de los 5,500 m (Figura 5) muestran una mayor regularidad. De enero a mayo, los vientos provienen del oeste ($250^{\circ}\sim 270^{\circ}$), aunque en mayo también se observan vientos provenientes del oriente ($90^{\circ}\sim 100^{\circ}$), pero con menor frecuencia. De junio a octubre los vientos que predominan son del oriente ($80^{\circ}\sim 100^{\circ}$), aún cuando se tienen máximos relativos del oeste y del norte. Los vientos en noviembre y diciembre soplan de nuevo del oeste (250°). Entonces, los vientos altos soplan de noviembre a abril del oeste y de junio a septiembre del este, los meses de mayo y octubre son de transición entre ambos patrones.

Las Figuras 6 (A, B, C y D) muestran en mayor detalle lo que sucede con los vientos en ocho estratos verticales definidos arbitrariamente. Los vientos superficiales (abajo de los 3,000 m) tienen comúnmente, una fuerte tendencia norte-sur, mientras que los vientos arriba de esta cota muestran en ocasiones las mismas tendencias que los vientos superiores (enero-abril), y en otras, una distribución dispersa pero transicional entre los vientos superficiales y los vientos superiores (junio-diciembre). En general, estas gráficas muestran las mismas tendencias descritas anteriormente para los vientos altos, sin embargo, a partir de los 20,000 m los vientos se comportan de manera diferente ya que los vientos provienen preferentemente del este ($80^{\circ}\sim 100^{\circ}$) de abril a noviembre y aunque esta dirección persiste de diciembre a marzo, los vientos del oeste también se llegan a presentar. El régimen de vientos a esta altitud, suele ser contrario a la dirección de los vientos en niveles inferiores (notoriamente en marzo, abril y noviembre, Figuras 6A, 6B y 6D).

Los vientos superficiales generalmente no rebasan los 5 m/s de velocidad promedio, y entre los 3,000 y 5,800 m, los vientos no soplan muy fuertemente, siendo enero el mes en que sopla con mayor fuerza (hasta 10 m/s en promedio, Figura 6A). Los vientos superiores soplan con mayor intensidad, típicamente 10 m/s y hasta 15 m/s a principios del año (noviembre-abril), aunque de mayo a octubre los vientos son menos fuertes (típicamente no más de 5 m/s) hasta los 16,500 m. Los vientos entre 16,500 m y 20,600 m suelen ser más constantes durante el año (de 5 a 15 m/s) y arriba de los 20,600 m los vientos pueden ser más fuertes, particularmente entre julio y septiembre (Figura 6C). Los vientos entonces, arriba de los 20,600 m se comportan más estables (provenientes persistentemente del este), aunque de dirección comúnmente opuesta a los vientos inmediatos inferiores y con velocidades que también suelen ser diferentes, típicamente más fuertes.

Las Figuras 7A, 7B, 7C y 7D, muestran la información de vientos de niveles seleccionados y no en forma de estratos como las anteriores. En ellas, se puede observar la gran variabilidad que presentan los vientos, tanto en función de la época del año como de acuerdo con los diferentes niveles atmosféricos. A pesar de la

complejidad que se observa en los patrones de viento para la Cuenca de México, algunas orientaciones muestran tendencias bien definidas.

Durante el período enero-abril, se observa un patrón de vientos dominantes del oeste-suroeste para los niveles troposféricos (hasta 16,500 m). Aunque para los vientos superiores (20,600 y 23,700 m), en enero y febrero, los vientos dominantes se ven acompañados por vientos del oeste y ocasionalmente de dirección opuesta, esto es evidente especialmente para el nivel de 26,300 m del mes de febrero. En marzo dominan además los vientos del oeste-noroeste, sin embargo, un cambio radical ocurre en abril para los mismos niveles, por lo cual puede considerarse este mes como de tipo transicional, donde estadísticamente, el nivel de 20,600 m muestra una dirección media del sureste, pero con vientos provenientes también del noreste y del oeste, en tanto que en los niveles superiores la tendencia es francamente con vientos dominantes del este.

En mayo, el cambio en la dirección de los vientos ocurre sin transiciones entre los niveles de 16,500 y 20,600 m, dejando de ser oeste-noroeste, oeste y oeste-suroeste en los niveles inferiores (troposféricos), en tanto que en los superiores (estratosféricos) las direcciones preferenciales son este y este-noreste.

A partir del mes de junio y hasta septiembre se observa un patrón sistemático este-noreste, este y este-sureste, que es opuesto al de los meses anteriores y que se aplica para todos los niveles (excepto para el de 10,900 m, en donde se encuentran distribuciones muy erráticas pero con cierto dominio de los vientos del noroeste, principalmente en el mes de junio). Cabe resaltar que a diferencia de lo anterior, en julio se puede apreciar una cierta bimodalidad direccional para el nivel de 26,300 m, en donde se presentan direcciones diametralmente opuestas (este-oeste).

En octubre el nivel de 5,800 m se considera transicional, ya que su comportamiento direccional es muy errático aunque con una componente media del sur-sureste, sin embargo, en los niveles de 10,900 y 16,500 m muestran direcciones preferenciales del oeste-suroeste y oeste-noroeste, en tanto que en los niveles superiores ésta es del este, opuesta a las superiores.

En noviembre ocurre algo muy similar al mes anterior, con la diferencia de que a los 5,800 m el comportamiento es menos errático, con una dirección media del oeste-suroeste que es congruente con los niveles inmediatos superiores, en tanto que en niveles mayores continua el dominio de los vientos del este-noreste.

En diciembre se observan cambios en diferentes altitudes, ya que a pesar de que se observan direcciones preferenciales al suroeste a 5,800 m y oeste-suroeste para 10,900 y 16,500 m, en los niveles estratosféricos el comportamiento es bipolar con direcciones este-oeste, aproximadamente.

PATRÓN DE VIENTOS MENSUAL

(ALTURA MENOR A 5500 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR)

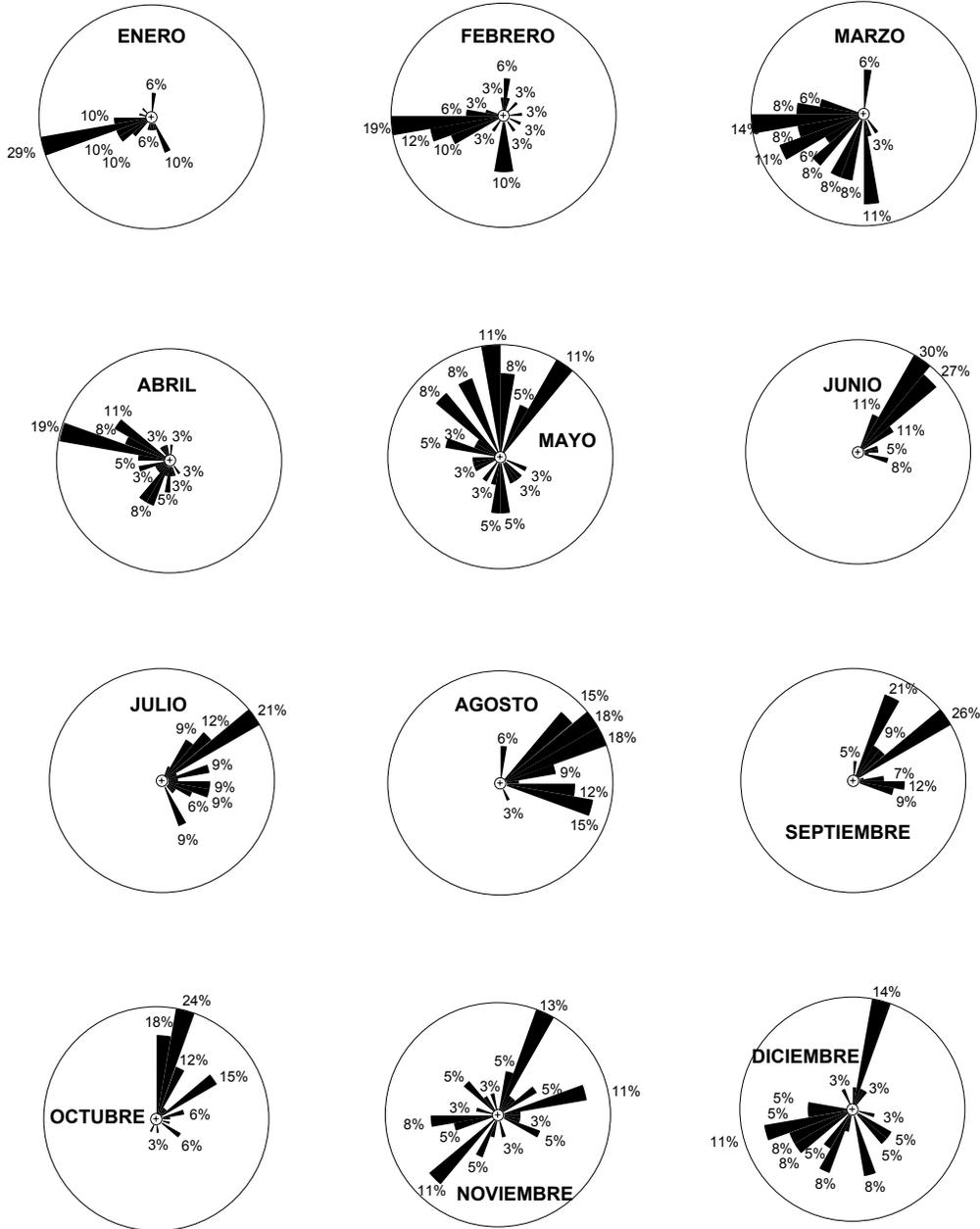


Figura 4. Patrón de vientos bajos. Histogramas circulares que muestran los vientos que soplan mensualmente debajo de los 5,500 m.s.n.m., indicando la frecuencia de ocurrencia de cada dirección en por ciento, cada barra representa un rango de 10°. Datos de 1976-1982.

PATRÓN DE VIENTOS MENSUAL

(ALTURA MAYOR A 5500 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR)

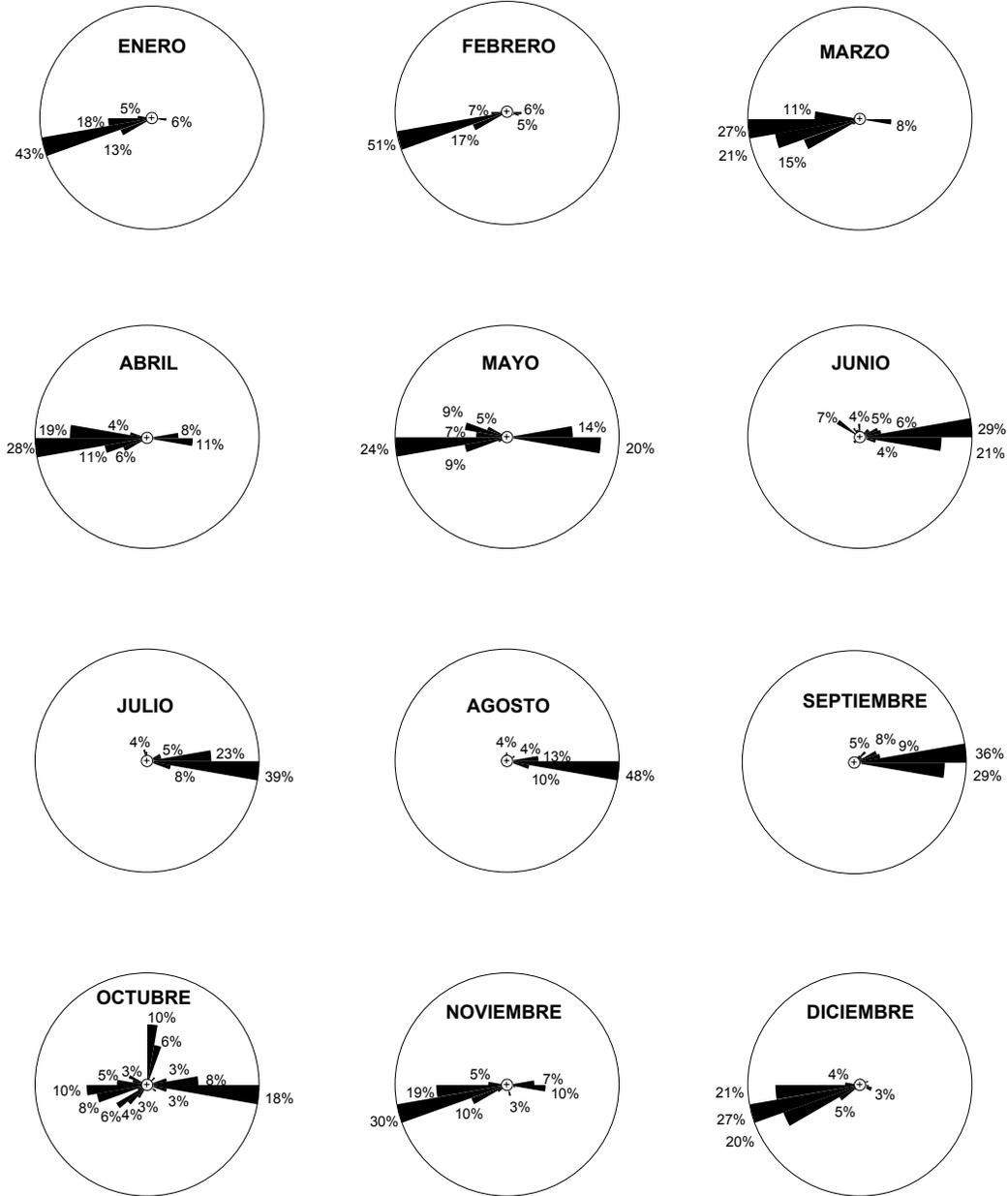


Figura 5. Patrón de vientos altos. Histogramas circulares que muestran los vientos que soplan mensualmente arriba de los 5,500 m.s.n.m., indicando la frecuencia de ocurrencia de cada dirección en por ciento. Datos de 1976-1982.

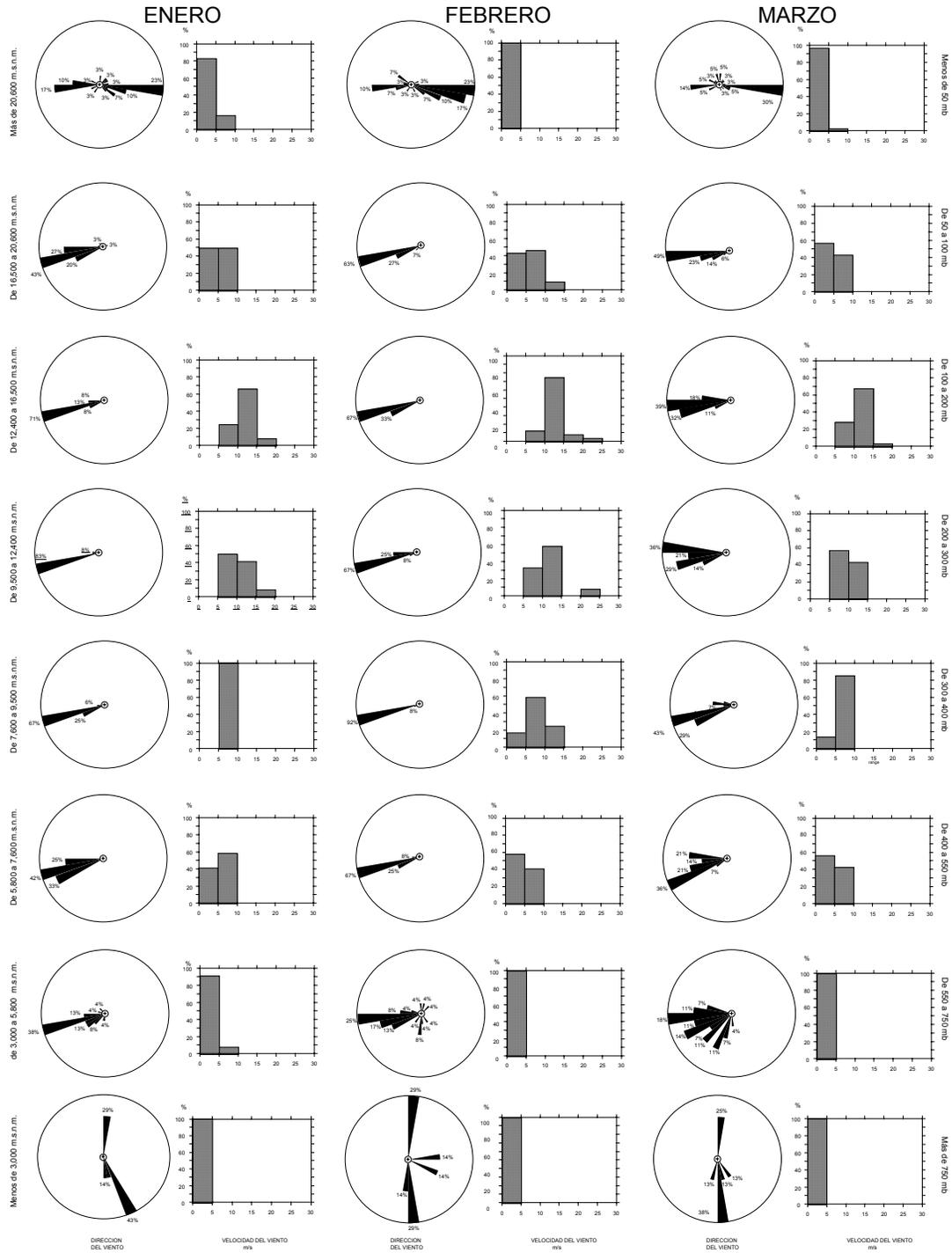


Figura 6. Patrones de viento por estratos. Los histogramas circulares muestran la dirección del viento indicando su frecuencia en por ciento y los histogramas rectangulares muestran la frecuencia de la velocidad del viento en m/s, para ocho estratos en los que se analizó información de los niveles incluidos en cada uno. A) histogramas enero-marzo.

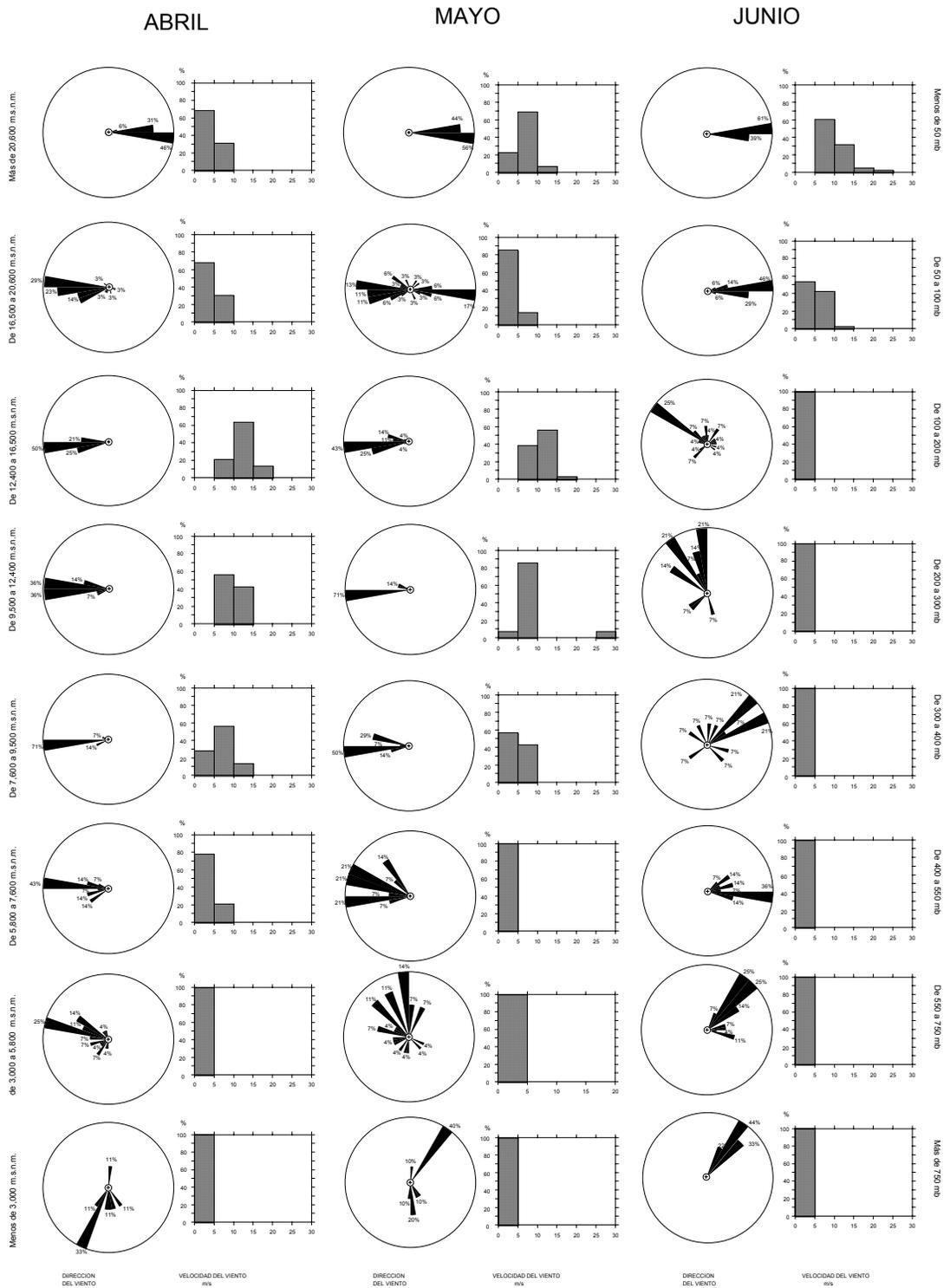


Figura 6. Patrones de viento por estratos. B) histogramas abril-junio.

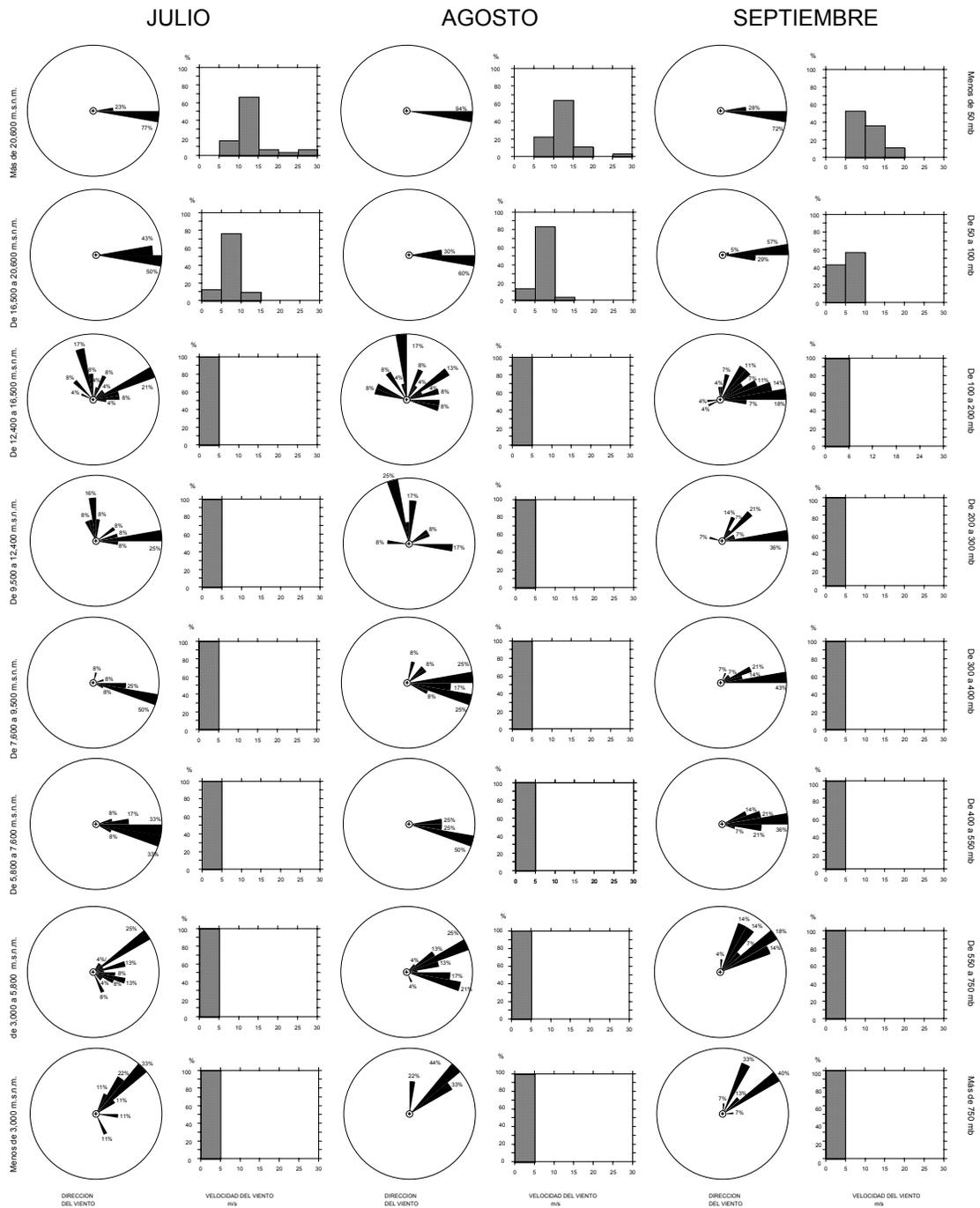


Figura 6. Patrones de viento por estratos. C) histogramas julio-septiembre.

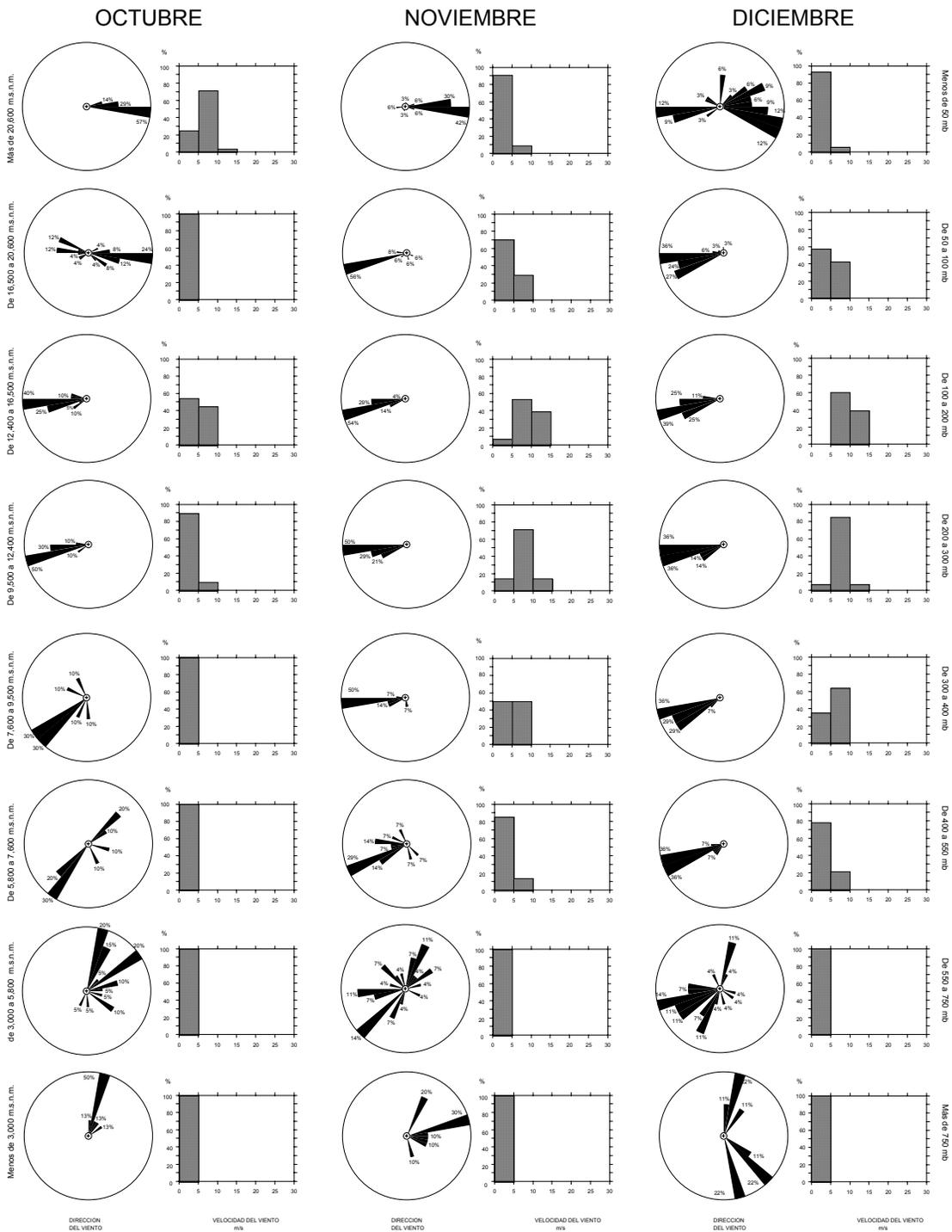


Figura 6. Patrones de viento por estratos. D) histogramas octubre-diciembre.

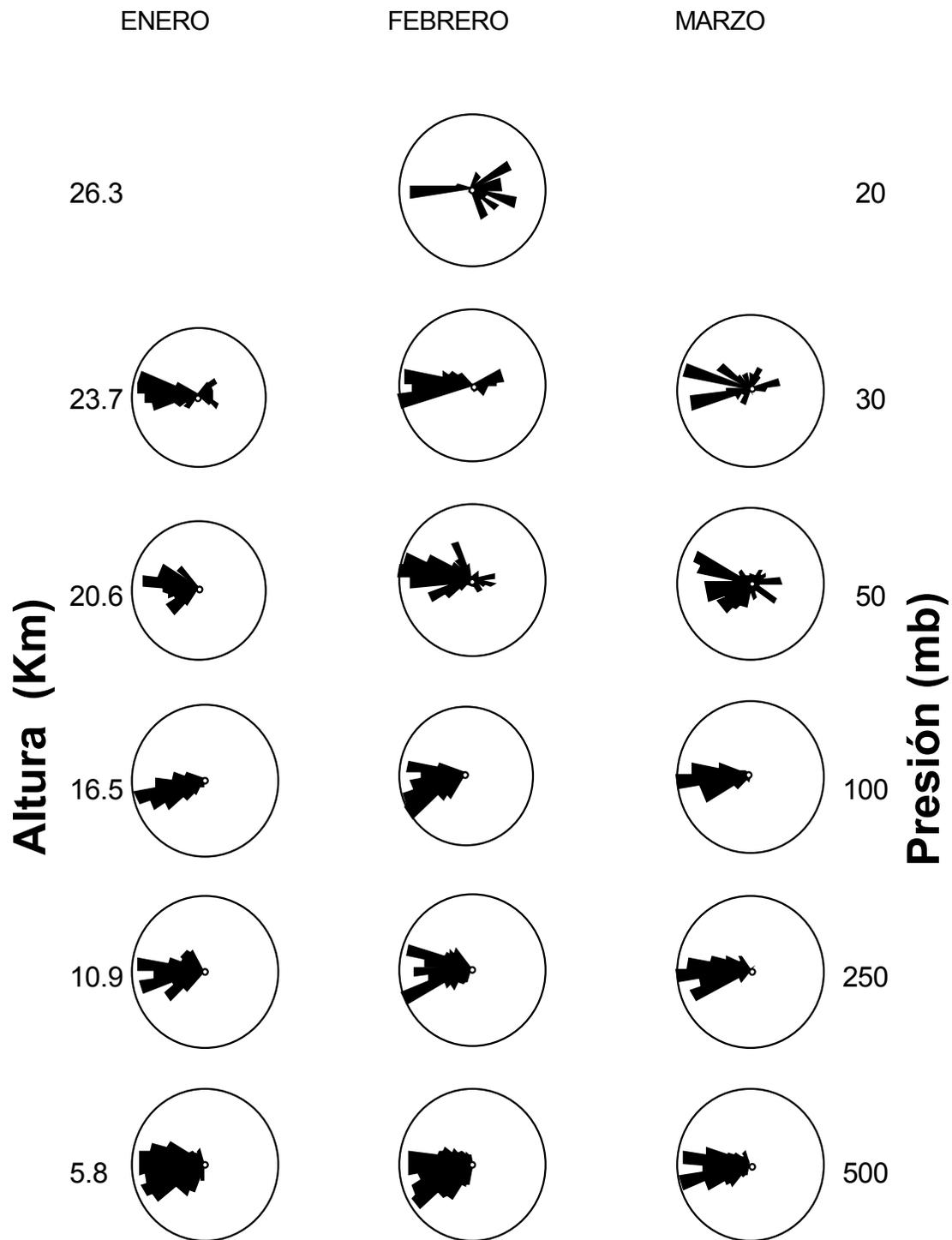


Figura 7. Patrones de viento por niveles seleccionados. Los histogramas circulares indican la procedencia del viento directamente de los datos de un nivel dado. A) histogramas enero-marzo.

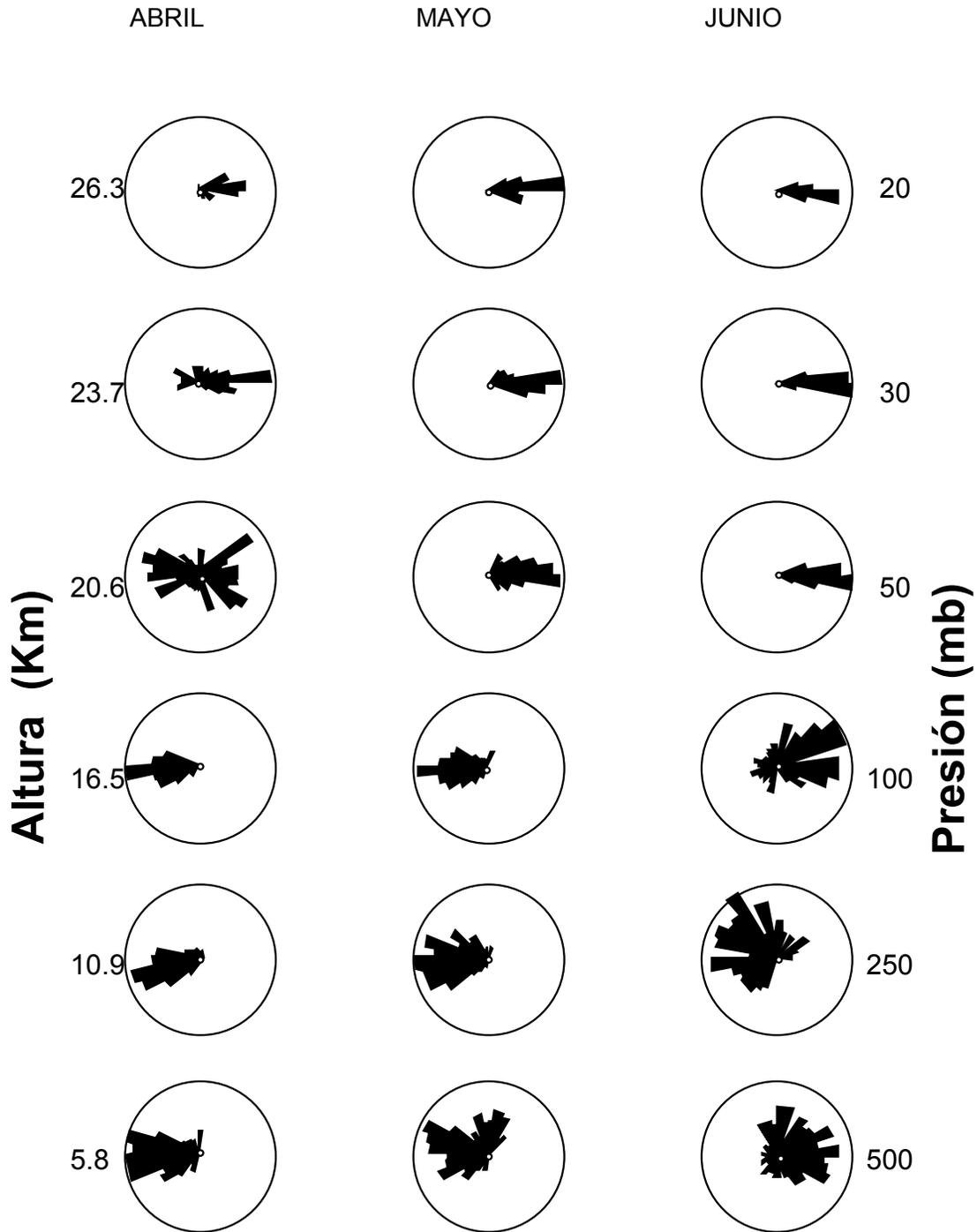


Figura 7. Patrones de viento por niveles seleccionados. B) histogramas abril-junio.

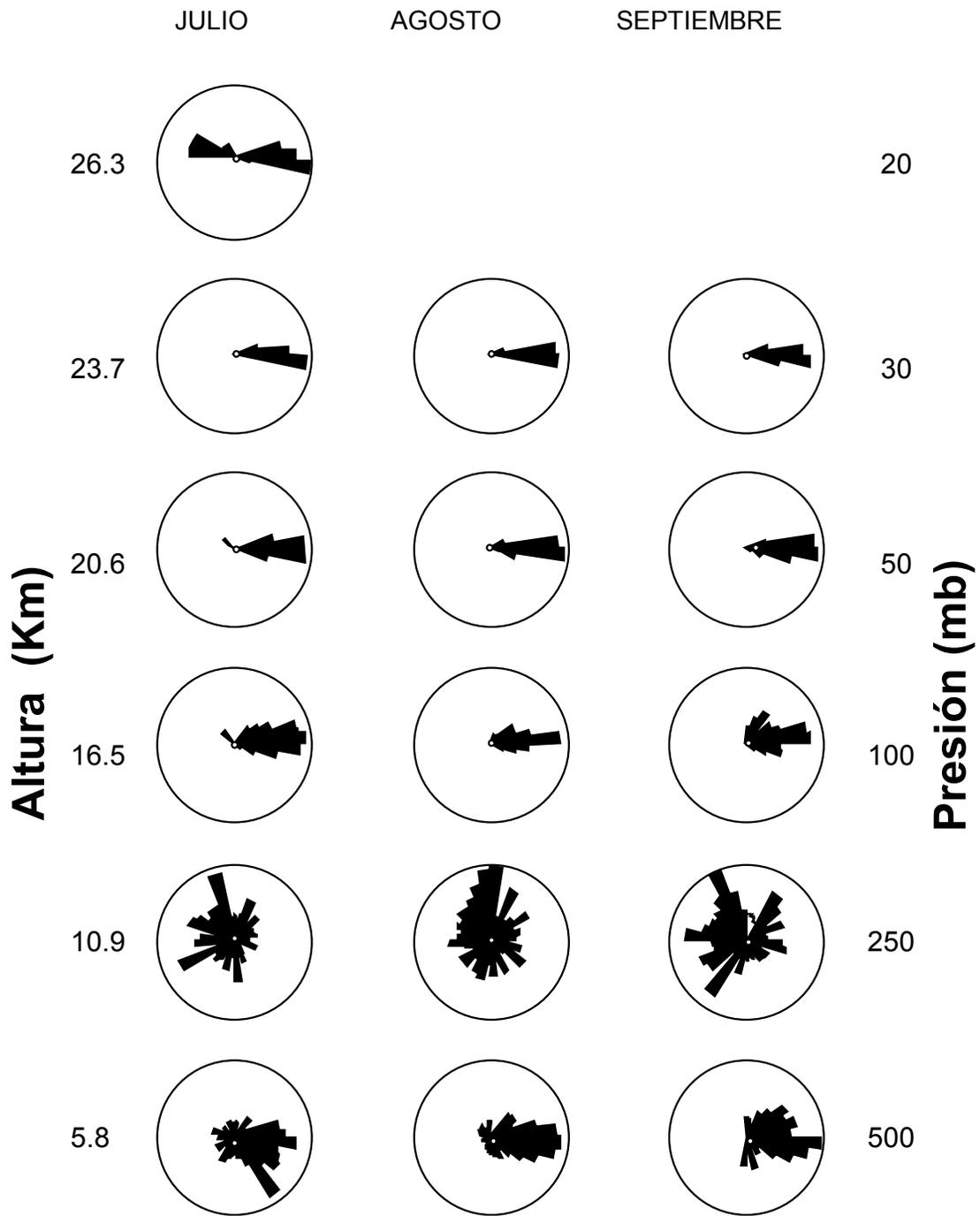


Figura 7. Patrones de viento por niveles seleccionados. C) histogramas julio-septiembre.

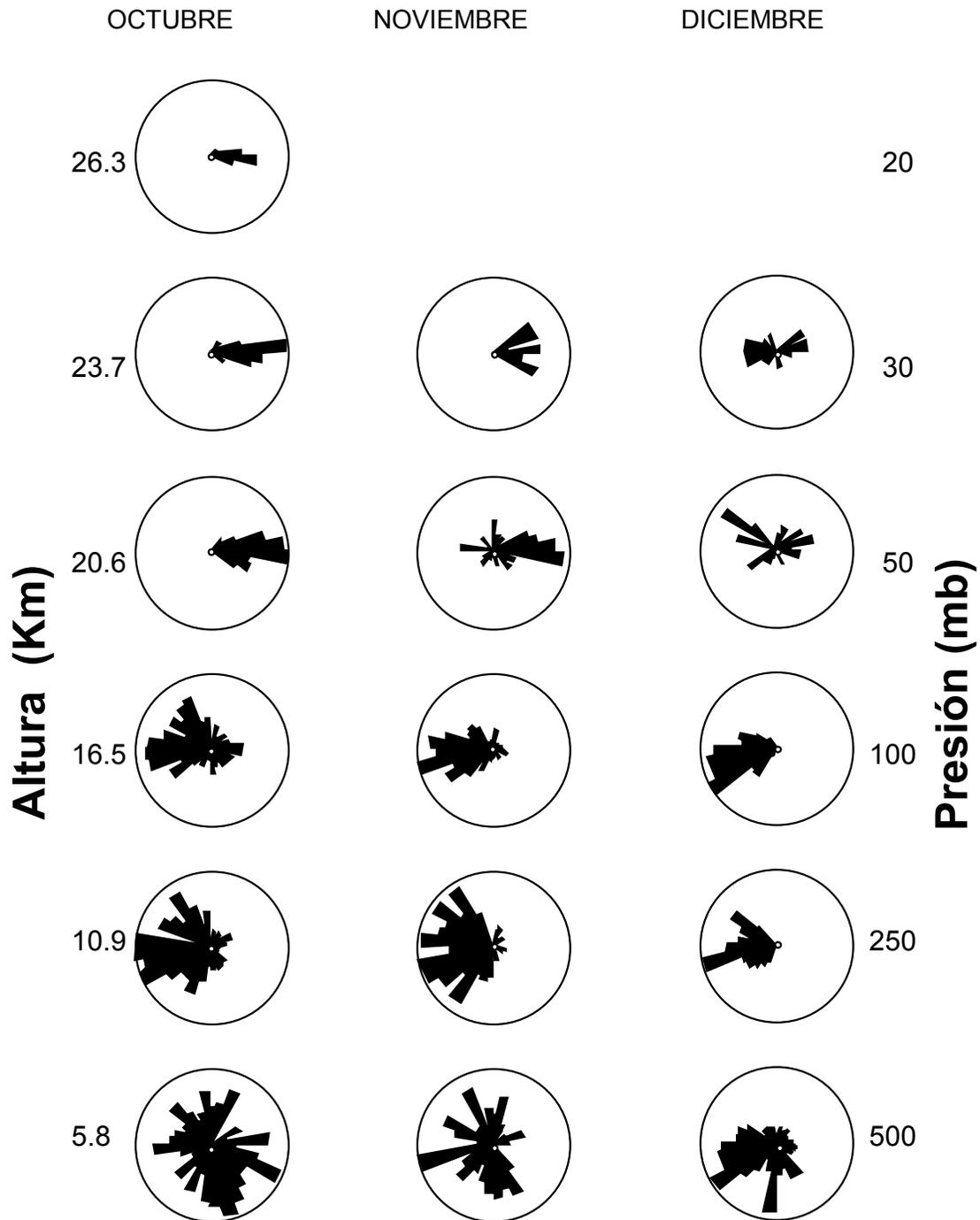


Figura 7. Patrones de viento por niveles seleccionados. D) histogramas octubre-diciembre.

Los vientos estratosféricos muestran el siguiente comportamiento:

- a) Nivel de 26,300 m. Se tiene una información de sólo algunos meses del año (febrero, abril, mayo, junio, julio y octubre), los cuales indican vientos predominantes del este, pero con ciertos cambios, particularmente en el mes de julio, cuando se presentan direcciones opuestas.
- b) Nivel de 23,700 m. De enero a marzo dominan los vientos del oeste-suroeste y oeste, mientras que de mayo a noviembre del este, siendo transicionales en los meses de abril y diciembre.
- c) Nivel de 20,600 m. De enero a marzo dominan los vientos del oeste-suroeste y oeste, mientras que de mayo a noviembre del este, siendo transicionales en los meses de abril y diciembre.

Los vientos troposféricos o cercanos a la tropopausa muestran el siguiente comportamiento:

- d) Nivel de 16,500 m. Desde noviembre hasta mayo se presentan vientos del oeste-suroeste, cambiando de junio a septiembre por vientos del este-noreste, con una notoria transición en octubre aunque dominando los vientos del oeste-noroeste.
- e) Nivel de 10,900 m. Vientos del oeste-suroeste dominan desde diciembre hasta mayo, observando una gran variabilidad desde junio hasta septiembre, con excepción del mes de agosto que muestra una componente dominante del noroeste y norte-noroeste. De octubre a noviembre el viento también varía mucho, pero muestra tendencias más definidas del oeste-suroeste.
- f) Nivel de 5,800 m. De enero a abril los vientos dominantes son del oeste-suroeste, cambiando en mayo en forma transicional, con una componente media del noroeste. De junio a septiembre se presentan vientos opuestos con direcciones dominantes que varían desde este-noreste hasta este-sureste, aunque en agosto y septiembre dominan claramente los vientos del este. En octubre se presenta un comportamiento variable, mientras que noviembre y diciembre, aunque también variables, muestran cierto dominio de los vientos procedentes del suroeste.

La Figura 8 muestra un corte transversal de vientos entre México y Veracruz para el año de 1993. Aún cuando esta figura sólo muestra datos de un solo año, esquematiza el comportamiento del viento en la región del Popocatepetl durante todo el año. Es notoria la influencia de las montañas sobre los vientos a menos de 5,800 m y la relativa homogeneidad de los vientos arriba de esta cota. Para este año en particular, se observa un patrón definido de vientos provenientes del oeste en general, de octubre a mayo para los niveles troposféricos superiores. El cambio de dirección del oeste al este se da en junio y julio de manera transicional, comenzando a darse en niveles hasta cerca de los 10,000 m, invirtiéndose en agosto de la misma manera a niveles cercanos a los 11,000 m y en septiembre los vientos soplan hacia el oeste casi en todos los niveles. El cambio de patrón en octubre se da en forma abrupta de vientos del este a vientos del oeste.

CORTE TRANSVERSAL DE VIENTOS MEXICO-VERACRUZ 1993

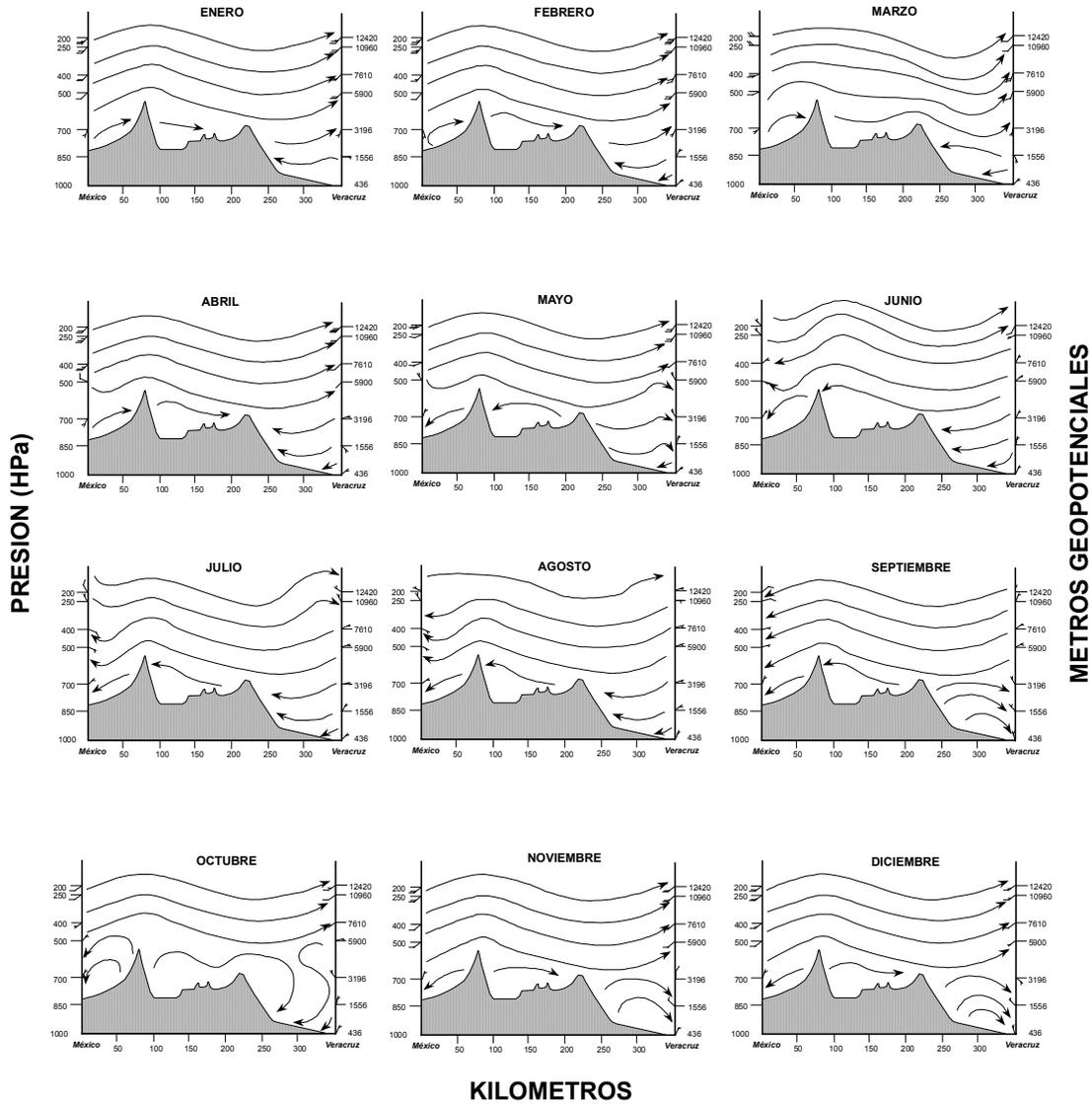


Figura 8. Corte transversal de vientos México-Veracruz para el año de 1993. La presión está dada en milibars (hPa) y su equivalente aproximado en metros (equipotenciales).

5.7 Distribucion de Cenizas en la Vecindad del Popocatepetl

La identificación de patrones definidos que caracterizan el comportamiento de los vientos en la atmósfera es de gran importancia para pronosticar las tendencias probables que estos podrían seguir en el futuro. Asumiendo que tales patrones de viento no se verán modificados por perturbaciones atmosféricas ajenas, que suelen ocurrir en forma eventual, es posible poder aplicar estos resultados en la evaluación de peligros asociados a futuras erupciones del volcán Popocatépetl, de diferentes magnitudes y alcances.

Las áreas de posible afectación asociadas con la lluvia de materiales piroclásticos asociados con una erupción, de acuerdo con los resultados reportados, deben considerar tanto la época en la que ocurra el evento volcánico como el tipo de erupción de que se trate, ya que de ello dependerá la altura de la columna eruptiva y, por lo tanto, la influencia de los patrones de vientos troposféricos o estratosféricos.

El Popocatépetl ha tenido en el pasado erupciones de todo tipo, desde pequeñas erupciones estrombolianas hasta las de mayor explosividad (vulcanianas a plinianas)(Delgado et al., 1988; Delgado et al., 1994; Siebe et al., 1995). En la Tabla 1 se muestra una clasificación de eventos volcánicos de acuerdo a su índice de explosividad (VEI) (Newhall y Self, 1982), en donde se pueden notar los rangos en altitud de la columna eruptiva asociada a erupciones de tipo estromboliano (máximo 5 kilómetros arriba del cráter), vulcaniano (hasta 25,000 m.s.n.m.) o pliniano-ultrapliniano (más de 25,000 m.s.n.m.).

Conociendo los rangos de actividad eruptiva del volcán Popocatépetl y las altitudes típicas que alcanzan las columnas eruptivas de acuerdo al tipo de erupción (Tabla 1), se puede proceder a hacer una estimación de la posible distribución de tefras en la vecindad del volcán. Cabe señalar que los eventos vulcanianos observados hasta el momento, han alcanzado altitudes de columna comparables a los eventos subplinianos y no siguen los esquemas de la Tabla 1.

La Figura 9 muestra en forma sintética las direcciones preferenciales de los vientos a diferentes elevaciones encima del cráter del Popocatépetl, de acuerdo con la época del año.

En el caso de un evento de tipo estromboliano o vulcaniano de baja magnitud, entre octubre y mayo, las áreas de afectación más probables son las ubicadas en el sector oriental del volcán, mientras que en los meses de junio a septiembre, las áreas afectadas estarían en el sector opuesto. De acuerdo a las velocidades de viento a estas altitudes, la distribución de las tefras podrían alcanzar hasta 100 km respecto a la fuente.

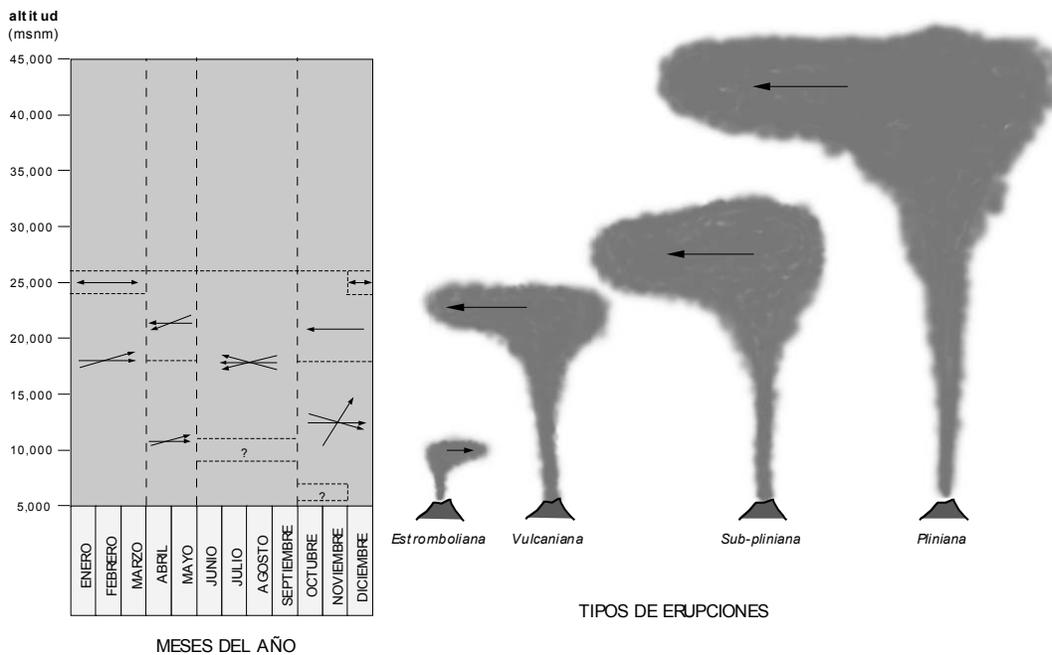


Figura 9. Tendencias generales de los vientos dominantes en el Valle de México, con respecto a la altitud y a la época del año (indicados con flechas). Los datos de vientos comprenden hasta aproximadamente 26,300 m.s.n.m. (línea punteada horizontal). Los signos de interrogación indican niveles de vientos altamente variables. Las caricaturas de la derecha esquematizan columnas eruptivas de diferentes tipos de acuerdo con el índice de explosividad.

Por otra parte, si se considera un evento de moderada a alta explosividad, es decir, de tipo vulcaniano a pliniano, los vientos dominantes transportarían el material piroclástico correspondiente a la parte alta de la columna eruptiva (región de paraguas, Figura 2) hacia el sector occidental del volcán, excepto durante los meses de enero a marzo, en que se tienen vientos del oeste y oeste-suroeste.

Los patrones mencionados son el resultado de un análisis estadístico y por tanto, los vientos presentes durante un evento explosivo pueden variar fuertemente respecto a los promedios. Modificaciones temporales como la presencia de nortes y eventos “El Niño” pueden ser la fuente de fuertes variaciones, así como los cambios que el clima sufre en la actualidad. Sin embargo, los resultados mencionados son útiles para fines de planeación ya que permiten identificar las zonas de mayor vulnerabilidad ante la presencia de eventos explosivos del volcán Popocatépetl.

5.8 Conclusiones

Las altitudes calculadas para el alcance de los productos balísticos del volcán Popocatepetl se desprende que las aeronaves no deben sobrevolar el cráter del Popocatepetl en una altura menor a 8 km por encima del mismo.

Los vientos superficiales (abajo de los 3,000 m) tienen una fuerte tendencia nortesur sin rebasar los 5 m/s de velocidad promedio, mientras que los vientos entre 3,000 y 5,800 m muestran de enero a abril las mismas tendencias que los vientos superiores (>5,800 m). De junio a diciembre se observa una distribución dispersa pero transicional entre los vientos superficiales y los vientos superiores (junio-diciembre) con velocidades entre 5 y 10 m/s.

Los vientos superiores (hasta 20,000 m) soplan de noviembre a abril del oeste y oeste-suroeste; y de junio a septiembre del este (este-noreste, este y este-sureste) excepto en abril a los 10,900 m cuyo comportamiento es sumamente irregular. Los meses de mayo y octubre son de transición. Entre abril y mayo los vientos guardan el mismo patrón oeste y oeste-suroeste hasta los 16,500 y de esta altitud hasta los 20,600 m las direcciones son diametralmente opuestas (este y este-noreste). Estos vientos soplan a mayor velocidad, típicamente 10 a 15 m/s.

A partir de los 20,600 m los vientos provienen preferentemente del este (80°-100°) de abril a noviembre y aunque esta dirección persiste de diciembre a marzo, también se presentan vientos del oeste en estos últimos meses, que suelen ser más fuertes (hasta 20-30 m/s), particularmente entre julio y septiembre.

La topografía montañosa ejerce una gran influencia sobre los vientos a menos de 5,800 m, observándose una relativa homogeneidad en los patrones de viento arriba de esta cota.

En el caso de eventos de tipo estromboliano o vulcanianos de baja magnitud, entre octubre y mayo, las tefras se distribuirían preferentemente hacia el oriente del volcán (Estado de Puebla), mientras que en los meses de junio a septiembre, se distribuirían hacia el occidente (Estado de México y Distrito Federal). De acuerdo a las velocidades de viento a estas altitudes, la distribución de las tefras más finas podrían alcanzar hasta 100 km respecto a la fuente.

Por otra parte, si se considera una erupción de moderada a alta explosividad, es decir, de tipo vulcaniano a pliniano los vientos dominantes transportarían el material piroclástico correspondiente a la parte alta de la columna eruptiva hacia el sector occidental del volcán (Estado de México y Distrito Federal), excepto durante los meses de enero a marzo, en que se tienen vientos del oeste y oeste-suroeste y por tanto la distribución sería hacia el oriente (Estado de Puebla).

El Estado de Morelos podría recibir lluvia de cenizas del volcán de acuerdo a patrones de viento bajos (superficiales), mientras que el Estado de Tlaxcala podría recibir cenizas (muy finas) en caso de un evento explosivo durante los meses de octubre a diciembre, debido a la dirección y velocidad del viento en esta época a 10,000 m de altitud. El Distrito Federal podría experimentar lluvias de cenizas

durante una erupción en los meses de junio a septiembre independientemente del tamaño de la erupción o de abril a diciembre si se trata de una columna subpliniana a pliniana.

5.9 Perspectivas Futuras

Si bien los análisis estadísticos de las bases de datos son muy útiles para reconocer los patrones de viento, éstos no son más que patrones que indican la mayor probabilidad de dirección e intensidad del viento en una época dada.

Para la observación de trayectorias y movimientos de las nubes de cenizas en tiempo real, es decir, tal como ocurre el fenómeno, se requieren datos actualizados a cada momento y a altitudes superficiales y altas (hasta 20 km de altitud cuando menos). Los radiosondeos son muy útiles para obtener datos del viento en las diferentes capas atmosféricas, sin embargo, se llevan a cabo sólo dos radiosondeos diarios (a las 6 de la mañana y de la tarde), los cuales son suficientes para el trabajo meteorológico pero no para el pronóstico de movimiento de una nube de cenizas. En tiempos de emergencia volcánica, es difícil implementar radiosondeos extraordinarios pues el tiempo de respuesta puede exceder el tiempo que tardarían las cenizas en llegar a las instalaciones aeroportuarias.

Una herramienta poderosa para obtener datos de viento en tiempo real son los perfiladores de viento. Con el fin de conocer las condiciones del viento a nivel de la región de la Cuenca de México, se requiere instalar mínimo un instrumento, idealmente tres o cuatro. De esta manera se tendrían datos de viento en tiempo real de varios niveles de la atmósfera que permitirían predecir las direcciones de trayectoria de las nubes de ceniza tal como se eleva en diferentes altitudes. El costo de este tipo de instrumentos es elevado pero su utilidad justifica su adquisición.

Reconocimientos

Este reporte está basado principalmente en el trabajo publicado por el CENAPRED en 1995 (Delgado et al., 1996). Se agradece la valiosa colaboración del personal del Servicio Meteorológico Nacional, en particular al Ing. Alfonso Medina.

Referencias

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., Delgado-Granados, H., Farraz Montes, I. A., 2001, Mapa de peligros por caída de productos balísticos del Volcán Popocatepetl. Publicación del Instituto de Geofísica y el Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., y Delgado-Granados, H., Determination of hazard zones by ballistic-product-fall during volcanic explosions: case study Volcán Popocatepetl (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Allard, P., D. Dajlevic, y C. Delarue, 1989, Origin of carbon dioxide emanation from the 1979 Dieng eruption, Indonesia: implications for the origin of the 1986 Nyos catastrophe, *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 39, 2-3, pp. 195-206.

Baxter P.J., 1988, Lake Nyos, Cameroon: Medical Aspects of large Scale Volcanic gas Emissions, Kagoshima International Conference on Volcanoes, pp. 713-715.

Baxter, P. J. y M. Kapila, 1989, Acute health impact of the gas release at Lake Nyos, Cameroon, 1986, *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 39, 2-3, pp. 265-275.

Bernstein R. S. y A.S. Buist, 1986, Health effects of volcanoes: an approach to evaluating the health effects of an environmental hazard, *American Journal of Public Health*, 96, supplement, pp. 1-90.

Blong R.J., 1982, The time of darkness: Local legends and volcanic reality in Papua New Guinea, Australian National University Press, Canberra, 257 pp.

Blong, R.J., 1984, Volcanic hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions. Academic Press, Orlando, Florida, pp. 21-26.

Bower, S.M. y Woods, A.W., 1996. On the dispersal of clasts from volcanic craters during small explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73 pp.19-32.

Buist A.S., 1988, Evaluation of the Short and Long Term Effects of Exposure to Inhaled Volcanic Ash from MT. ST. Helens, Kagoshima International Conference on Volcanoes, pp. 709-712.

Carey S. y Sparks R.S.J., 1986, Quantitative Model of the Fallout and Dispersal of Tephra From Volcanic Eruption Columns, *Bull. Volc.* 48, pp. 109-125.

Cas R.A.F. y Wright J.V., 1988, Volcanic Successions (Modern and Ancient): A Geological Approach to Processes, Products and Successions, Allen and Unwin, Londres, 528 pp.

Delgado H., M. Panfil, E. A. González, G. Uruñuela, P. Plunket, T. Gradner y M. Abrams, 1994, Lesson from Popocatepetl volcano (México): Ancient Settlement buried by lavas, mudflows, and air-fall deposits, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 75, 44, p.737.

Fagents, S.A. and Wilson, L., 1993. Explosive volcanic eruptions- VII. The ranges of pyroclasts ejected in transient volcanic explosions. *Geophys. J. Int.*, 113, p p. 359-370.

Fisher R.V., 1961, Proposed Classification of Volcaniclastic Sediments and Rocks, Geol. Soc. Amer. Bull., 72, pp.1409-1414.

Fisher R.V. y Schmincke H.-U., 1984, Pyroclastic Rocks, Springer-Verlag, Berlin, 472 pp.

Fudali, R.F. and Melson, W.G., 1972. Ejecta velocities, Magma Chamber Pressure and Kinetic Energy Associated with the 1968 Eruption of Arenal Volcano. Bulletin of Volcanology, 35, pp. 383-401.

Koizumi A., Yano E. J., Higashi H., y Nishi S., 1988, Health Effects of Volcanic Eruptions, Kagoshima International Conference on Volcanoes, pp. 705-712.

Le Guern F., 1982, An Example of Health Hazard: People Killed by Gas during a Phreatic Eruption: Dieng Plateau (Java, Indonesia), February 20th 1979, Bulletin Volcanologique, Vol. 45-2, pp. 154-156.

Newhall C. G. y Self S., 1982, The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, Jour. Geophys. Res., 87, pp. 1231-1238.

Rees J.D., 1979, Effects of the eruption of Parícutin volcano on landforms, vegetation, and human occupancy, in Volcanic Activity and Human Ecology, edited by P.D. Sheets and D.K. Grayson, Academic Press, New York, pp. 249-292.

Shirakawa M., 1988, Experimental studies on the Effects of MT. Sakurajima Volcanic Ashes on the Respiratory Organs, Kagoshima International Conference on Volcanoes, pp. 720-722.

Siebe C., J. L. Macías, M. Abrams, S. Rodríguez, R. Castro y H. Delgado, 1995 (en prensa), Explosive Volcanism in Central-Eastern México, Geological Society of America, Field Guide Book.

Sigurdsson H., Devine J. D., Tchoua F. M., Presser T. S., Pringle M. K. W., y Evans W. C., 1987, Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroon, Jour. Volc. Geother. Res., 31, pp. 1-16.

Sigvaldson G. E., 1989, International Conference on Lake Nyos Disaster, Yaoundé, Cameroon 16-20 March, 1987: Conclusions and Recommendations, Jour. Volc. Geotherm. Res., 39, 2-3, pp. pp. 97-108.

Simkin T., Seibert L., McLelland L., Bridge D., Newhall C. G., y Latter J. H., 1981, Volcanoes of the world, Smithsonian Institution, Hutchinson Ross Pub. Co., Stroudsburg, Pa., 232 pp.

Sparks R.S.J., 1986, The dimensions and Dynamics of Volcanic eruption columns, Bull. Volcanol., 48, pp. 3-15.

Sparks R.S.J. y Wilson, L. 1976, A model for the Formation of Ignimbrite by Gravitational Column Collapse, J. Geol. Soc. London, pp. 441-452.

Tilling R.J., 1993, Monitoring active volcanoes, U.S. Geol. Surv. General-Interest Publications Series, 125 pp.

Waitt R.B., Mastin L.G., 1994, Velocities and Spin of Hydromagmatic Ballistics from MT. Spurr (Alaska), International Volcanological Congress, Ankara, Turquía, p.83.

Waitt, R.B., Mastin, L.G. & Miller, T.P., 1995 Ballistic Showers During Crater Peak Eruptions of Mount Spurr Volcano, Summer 1992. U.S.G.S. Bulletin, pp. 89-106.

Wilson, L., 1972. Explosive Volcanic Eruptions II. The Atmospheric Trajectories of Pyroclasts. Geophys. Jour. Roy. Astr., 30, pp. 381-392.

Wilson C.J.N., 1980, The Role of Fluidisation in the Emplacement of Pyroclastic Flows: An experimental approach, J. Volcanol. Geotherm. Res., 8, pp. 231-240.

6. SISTEMA DE MONITOREO Y VIGILANCIA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Roberto Quaas Weppen, Enrique Guevara Ortíz, Servando de la Cruz Reyna, Carlos Valdés González y Gilberto Castelán

6.1 Introducción

Los volcanes pueden tener diferentes manifestaciones que representan un riesgo para la población. Entre los peligros volcánicos se encuentran las emisiones de lava, flujos piroclásticos, caída de cenizas, gases tóxicos, flujos de lodo, avalanchas, etc. Las columnas volcánicas inyectadas a la atmósfera contienen ceniza y aerosoles que pueden ocasionar daños a la aeronavegación.

Los sistemas de monitoreo y vigilancia juegan un papel muy importante en la evaluación y pronóstico de la actividad de los volcanes, así como en la detección y seguimiento de emisiones de ceniza y otros peligros asociados. Por esto es indispensable contar con un sistema completo de monitoreo y vigilancia que permita dar elementos a las autoridades para la toma oportuna de decisiones, implementar los planes de emergencia y, con ello, prevenir desastres.

6.2 Sistema de Monitoreo del Volcán Popocatépetl

La mejor manera de percibir y evaluar el estado de actividad y riesgo asociado a un volcán es a través de la observación y vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales. Si estos se aplican en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible, en la mayoría de los casos, detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad que inclusive pudiese conducir a una predicción en el corto plazo de un proceso eruptivo inminente y poner en marcha, por parte de las autoridades de Protección Civil, el plan de emergencia previamente establecido.

El sistema de vigilancia y monitoreo del volcán Popocatépetl ha demostrado su utilidad en la evaluación de la actividad del volcán desde 1994. En un esfuerzo conjunto del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), de la Secretaría de Gobernación; de los Institutos de Geofísica e Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México; y con la colaboración del Observatorio Vulcanológico de las Cascadas (CVO) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey) se estableció en los últimos años un moderno y completo sistema de observación telemétrico con una central de adquisición y procesamiento de datos.

Este sistema, ha logrado en más de 6 años de funcionamiento ininterrumpido y gracias al esfuerzo realizado por parte del personal encargado, proporcionar una extensa infraestructura para el registro y monitoreo. Esto ha permitido la vigilancia estrecha del volcán Popocatépetl, así como la detección oportuna de cualquier cambio en su estado de actividad.

Existen cuatro tipos de monitoreo establecidos en el volcán Popocatépetl:

- *Monitoreo visual*

Consiste en la apreciación por medios visuales y registros frecuentes de: emanaciones de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes, deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, o cualquier otra manifestación anómala. Este se lleva a cabo mediante observaciones a simple vista o con ayuda de binoculares, con registros fotográficos, cámaras de video y cámaras térmicas, entre otros. Adicionalmente, vuelos en avioneta y helicóptero.

- *Monitoreo sísmico*

Medición local o remota de la actividad microsísmica que permite localizar la fuente de energía e inferir la estructura interior del volcán, así como cambios en la misma. Para ello, se instalan redes de tres o más sismógrafos sobre y alrededor del volcán.

- *Monitoreo geodésico*

Es la medición de las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde su interior. Las medidas pueden realizarse por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, etc.) por gavitimetría y por otros métodos electrónicos como inclinómetros, radiotelemetría y mediante sistemas de posicionamiento global (GPS).

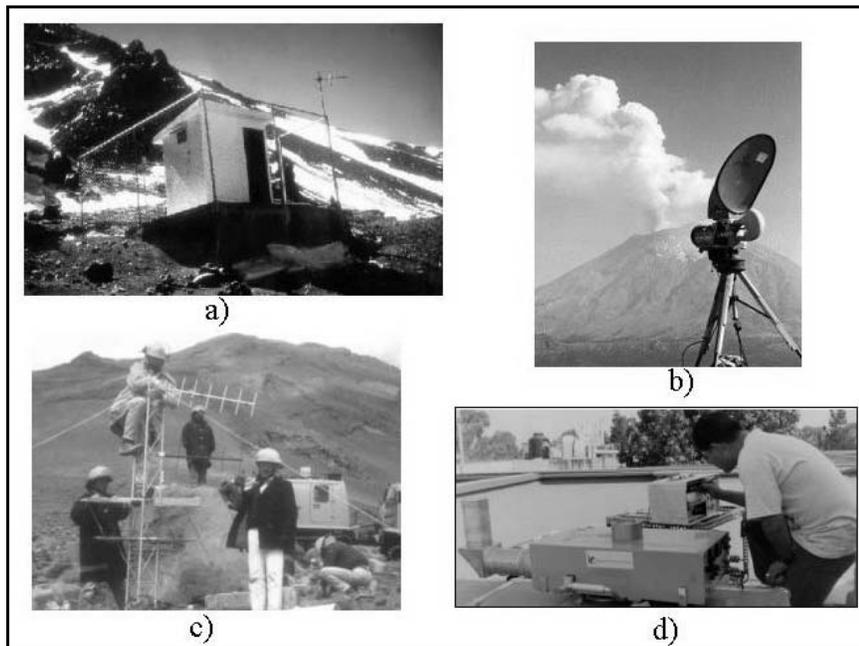
- *Monitoreo geoquímico*

Se refiere al análisis químico de concentrados y elementos en: gases de fumarolas y manantiales, cenizas, lavas y otros productos del volcán que son manifestación de su actividad. Otras variables asociadas y que generalmente también se monitorean son: vientos, temperatura, precipitación, pH y emanaciones de gas radón, entre otras. La utilización de equipos de espectrometría de correlación, COSPEC, es fundamental para medir la concentración de SO₂ emitido. También la utilización de un analizador de gases infrarrojo LICOR para medir la emisión de CO₂.

La red de monitoreo del Popocatépetl actualmente está compuesta por 15 estaciones localizadas en las laderas circundantes del volcán, en sitios con altitudes de hasta 4300 m y a 1.5 km del cráter. La instrumentación consta de ocho sismógrafos de periodo corto y tres de banda ancha; cuatro inclinómetros biaxiales para medir deformación; una cámara de video controlada en forma remota desde el CENAPRED con enlace de microondas; tres detectores de flujo en el costado norte del volcán; un radar doppler meteorológico (actualmente dañado); una cámara térmica y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos, determinación de las concentraciones de gases SO₂ y CO₂.



Distribución de las estaciones de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl



Diferentes aspectos de la instrumentación del volcán Popocatepetl:

- a) Estación sísmica Canario (PPP),
- b) Antena de microondas para imagen visual del volcán,
- c) Estación Sísmica e inclinométrica Los Cuervos
- d) Espectrógrafo de correlación (COSPEC) para medición de SO_2

Más de 50 señales de telemetría son transmitidas en forma continua hacia el puesto central de registro y procesamiento localizado en el CENAPRED. Allí se reciben todas las señales y mediante una extensa red de computadoras, la actividad es monitoreada y procesada las 24 horas del día.

Al detectarse cualquier incremento anormal de la actividad sísmica del volcán, se acciona una de alarma acústica y a través de un sistema de marcado automático se envían mensajes a teléfonos particulares, celulares y radio-localizadores del personal de guardia.



Sistema de Monitoreo del Volcán Popocatépetl

Del análisis de la información del volcán, las recomendaciones relativas al nivel de alertamiento son tomadas por el Comité Técnico Científico Asesor, integrado por investigadores de la UNAM y del CENAPRED. Mediante reportes especiales, autoridades del gobierno y de Protección Civil son informadas periódicamente acerca del nivel de actividad del volcán. Para el público en general se dispone de un buzón telefónico, el Popotel (5205-1036 y 01-800-123-5050), con mensajes sobre su estado de actividad, así como una página en Internet actualizada diariamente (www.cenapred.unam.mx).

Se mantiene además una estrecha comunicación con las autoridades de Protección Civil, la Secretaría de la Defensa Nacional y las autoridades del aeropuerto y de aeronavegación, a través del SENEAM.



Puesto Central de Procesamiento y registro del CENAPRED

7. ANÁLISIS DE ESCENARIOS POSIBLES DE FORMACIÓN DE DEPÓSITOS DE CENIZA VOLCÁNICA ALREDEDOR DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL, INCLUYENDO LOS SITIOS PROPUESTOS PARA AEROPUERTOS

Servando De la Cruz Reyna

7.1 Introducción

Se presentan algunos escenarios de caída y depósito de ceniza obtenidos con el modelo SECCVO de Alex Onar González-Mellado y Servando De la Cruz-Reyna (González-Mellado, 2000). Este modelo calcula la distribución del espesor de los depósitos de ceniza resultantes de posibles erupciones de diferentes intensidades y duraciones del Popocatepetl como función de la distancia, bajo diferentes condiciones de viento. El modelo considera coeficientes de difusión de ceniza en la atmósfera dependientes de la altura de la columna eruptiva.

7.2 Escenarios de espesor de ceniza depositada

Para fines de una estimación preliminar se generaron cuatro tipos de escenarios:

1. Escenarios de probabilidad relativamente mayor: (alturas de columna moderadas en el rango 4-14 km), con el viento dirigido precisa y directamente a los sitios considerados. Las probabilidades de ocurrencia de erupciones de este tipo son del orden de 10^{-3} (0.001). La probabilidad de ocurrencia de estos escenarios se obtendría multiplicando la probabilidad anterior por la probabilidad de que el viento sople exactamente en esa dirección durante la erupción. Como no se cuenta con estos valores no se precisan estas probabilidades, pero es posible que sus valores reduzcan al valor anterior en unos dos ordenes de magnitud.
2. Escenarios de probabilidad relativamente mayor: (alturas de columna moderadas en el rango 4-14 km), con el viento dirigido a un ángulo de 15° del radiovector del volcán a los sitios considerados (en cualquiera de los dos sentidos). Las probabilidades de ocurrencia de erupciones de este tipo son del orden de 10^{-3} . La probabilidad de ocurrencia de estos escenarios se obtendría multiplicando la probabilidad anterior por la probabilidad de que el viento sople en direcciones a $\pm 15^\circ$ respecto a la dirección del vector de viento durante la erupción. Como no se cuenta con estos valores no se

precisan estas probabilidades, pero es posible que sus valores se reduzcan en un orden de magnitud.

3. Escenarios de probabilidad relativamente menor (grandes alturas de columna, en el rango 16-26 km), con el viento dirigido precisa y directamente a los sitios considerados. Las probabilidades de ocurrencia de erupciones de este tipo son del orden de 10^{-4} . La probabilidad de ocurrencia de estos escenarios se obtendría multiplicando la probabilidad anterior por la probabilidad de que el viento sople exactamente en esa dirección durante la erupción. Como no se cuenta con estos valores no se precisan estas probabilidades, pero es posible que sus valores reduzcan al valor anterior en unos dos ordenes de magnitud (10^{-6}).
4. Escenarios de probabilidad relativamente menor (grandes alturas de columna, en el rango 16-26 km), con el viento dirigido a un ángulo de 15° del radiovector del volcán a los sitios considerados. Las probabilidades de ocurrencia de erupciones de este tipo son del orden de 10^{-4} . La probabilidad de ocurrencia de estos escenarios se obtendría multiplicando la probabilidad anterior por la probabilidad de que el viento sople en direcciones a $\pm 15^\circ$ respecto a la dirección del vector de viento durante la erupción. Como no se cuenta con estos valores no se precisan estas probabilidades, pero es posible que sus valores se reduzcan en un orden de magnitud.

A continuación se listan los escenarios de los tipos mencionados arriba y de acuerdo con las características de la posible erupción y de la dirección del viento. Las características de las erupciones que controlan los resultados del modelo son:

- Duración de la erupción. Para todos los casos se calculan los modelos para duraciones de 2, 4, 6 y 8 horas. Estas duraciones corresponden al tiempo que duraría la columna con la altura especificada.
- Para cada duración se utilizan diferentes alturas de la columna eruptiva. Para los modelos de los tipos 1 y 2 se calculan los espesores que producirían columnas de 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km (relativamente más probables $\sim 10^{-3}$). Para los modelos de los tipos 3 y 4 se calculan los espesores que producirían columnas de 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km sobre el nivel de la cima (relativamente menos probables $\sim 10^{-4}$). Las curvas en las gráficas aparecen en forma respectiva a estas alturas de columna y corresponden a menor altura a la izquierda y mayor altura a la derecha.
- En todos los casos se utiliza una velocidad típica del viento de 50 km/h a la altura correspondiente. En los casos 1 y 3 el viento se dirige directamente a la región de estudio. En los casos 2 y 4, el viento se dirige en una dirección de 15° a un lado u otro de la región de estudio.

- Los picos marcados en las gráficas representan las distancias del cráter del volcán a los centroides de los sitios propuestos (Texcoco, 66.5 km y Tizayuca 105.5 km)
- En todos los casos el eje vertical representa el espesor esperado de ceniza depositada expresado en centímetros, como función de la distancia (eje horizontal) expresada en kilómetros.

7.3 Resultados

Estimación de espesores de ceniza volcánica, depositada en función de la distancia para diferentes escenarios eruptivos del Popocatépetl, de acuerdo con el modelo de Alex Onar González

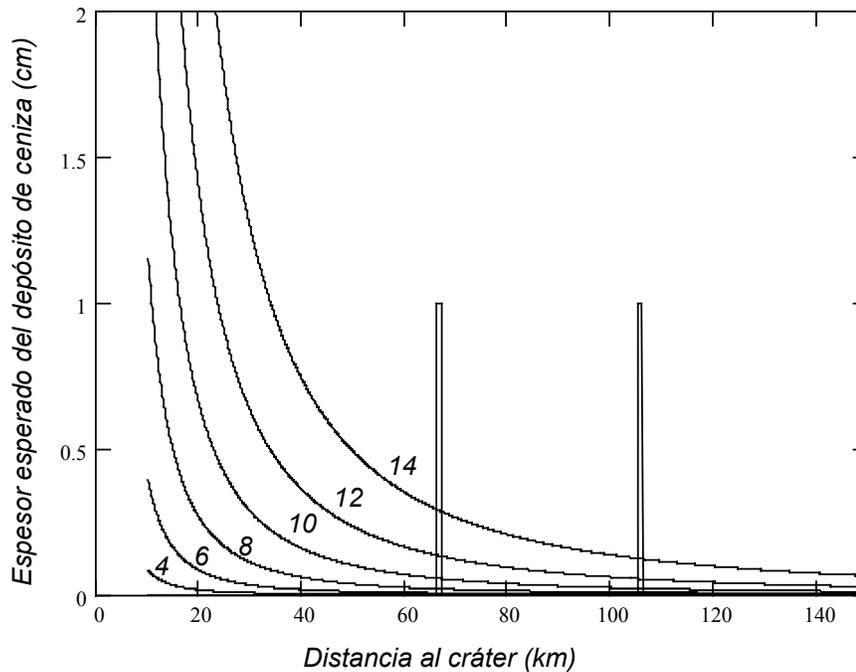
7.3.1 Escenarios Tipo 1

Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 2$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

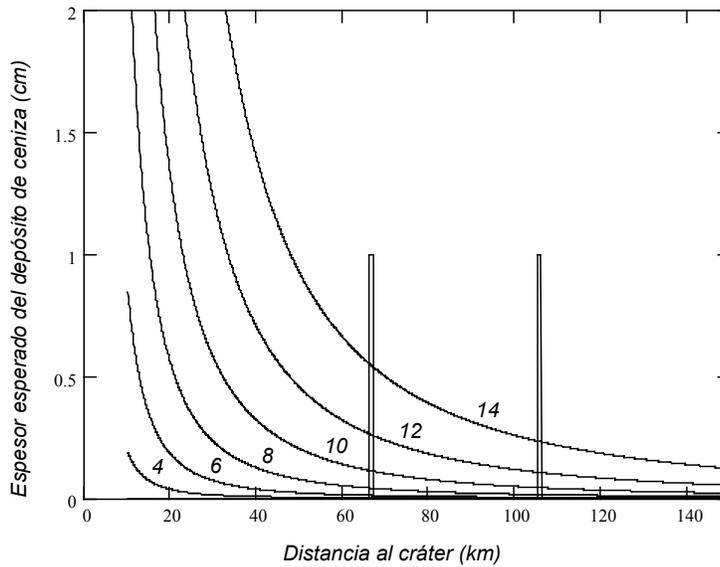


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 4$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

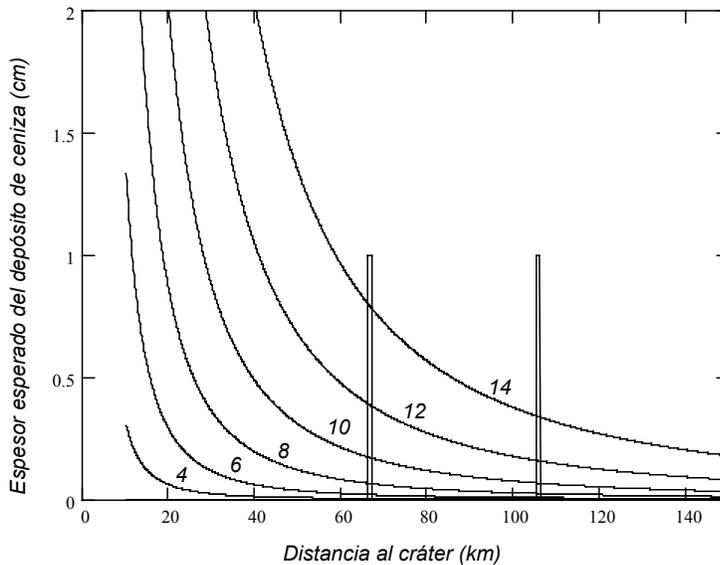


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 6$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

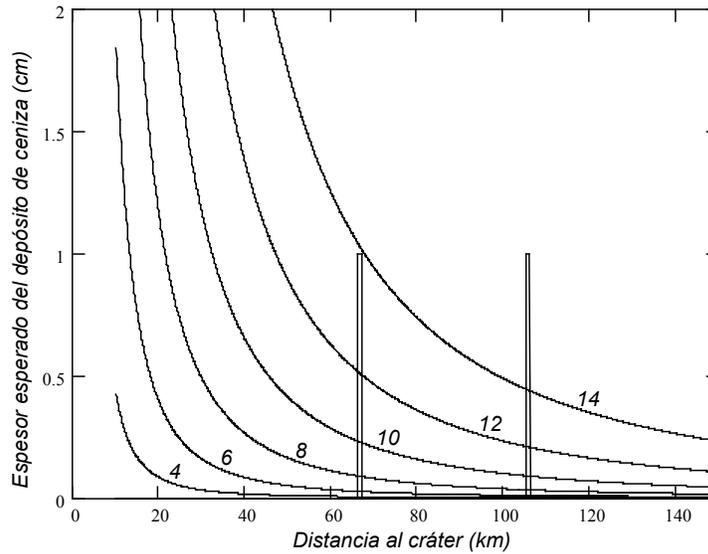


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 8$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km



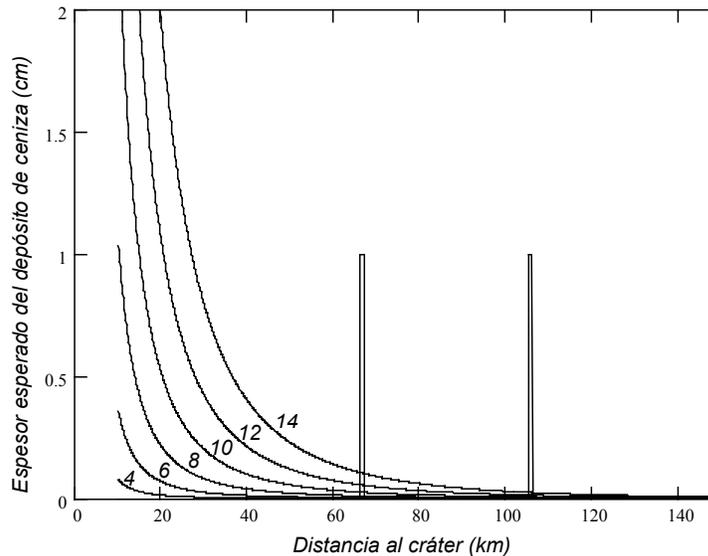
7.3.2 Escenarios Tipo 2 ($\alpha=15^\circ$)

Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 2$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

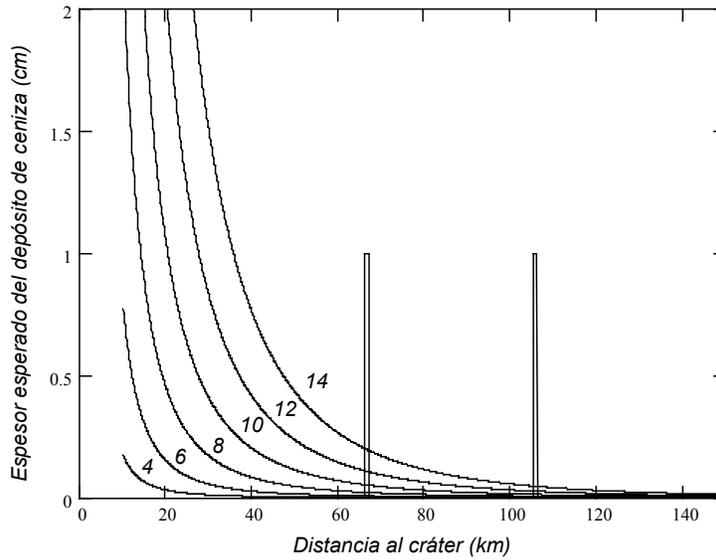


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 4$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

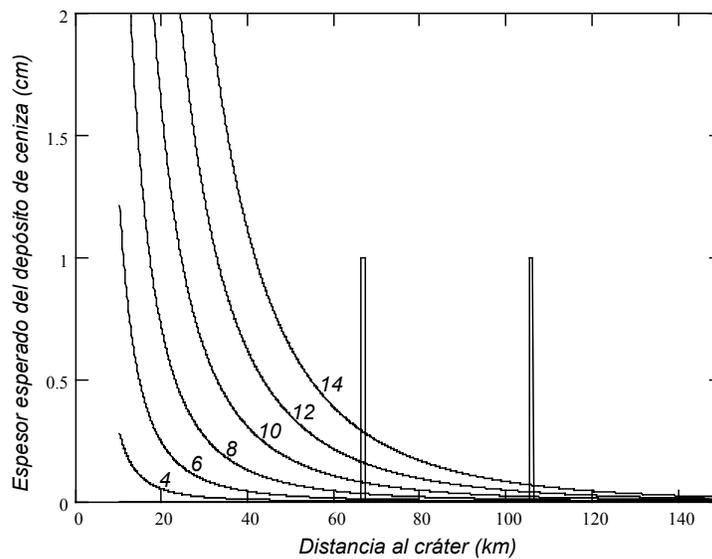


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 6$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km

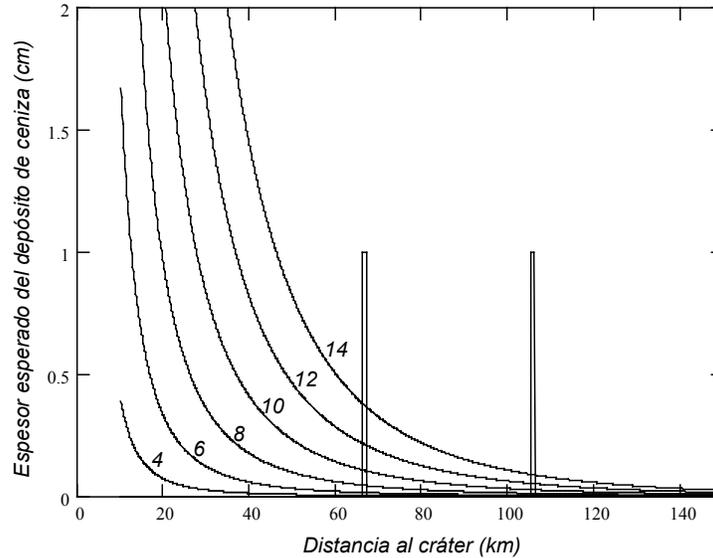


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 8$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 4, 6, 8, 10, 12 y 14 km



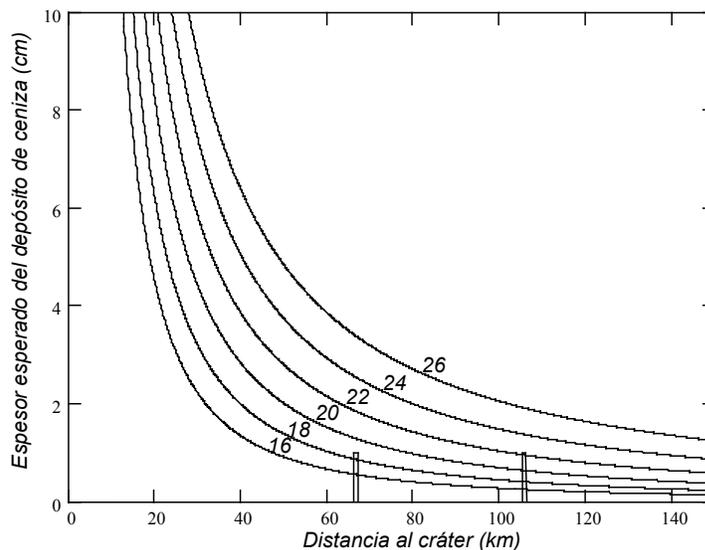
7.3.3 Escenarios Tipo 3

Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 2$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

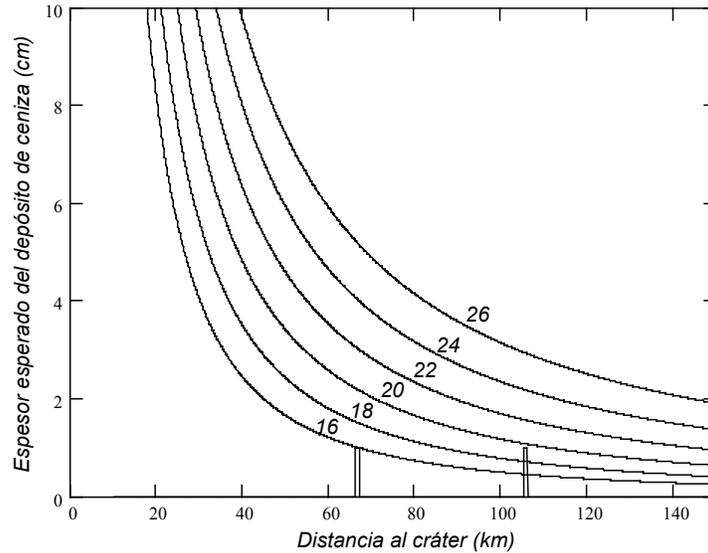


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 4$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

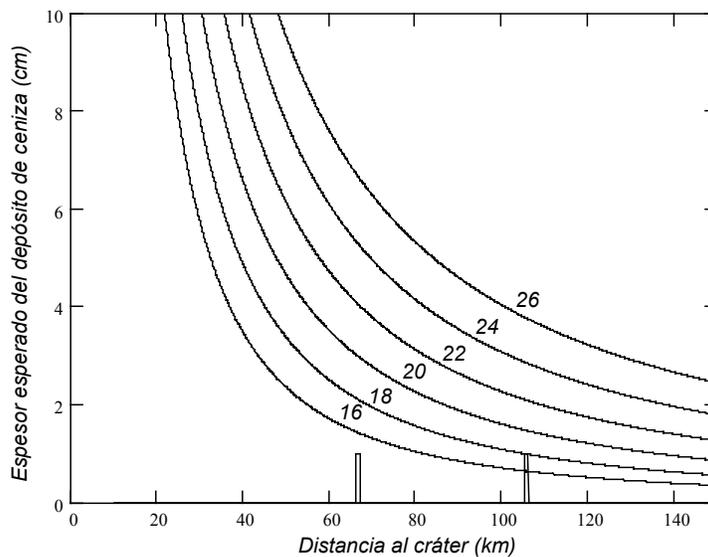


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 6$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

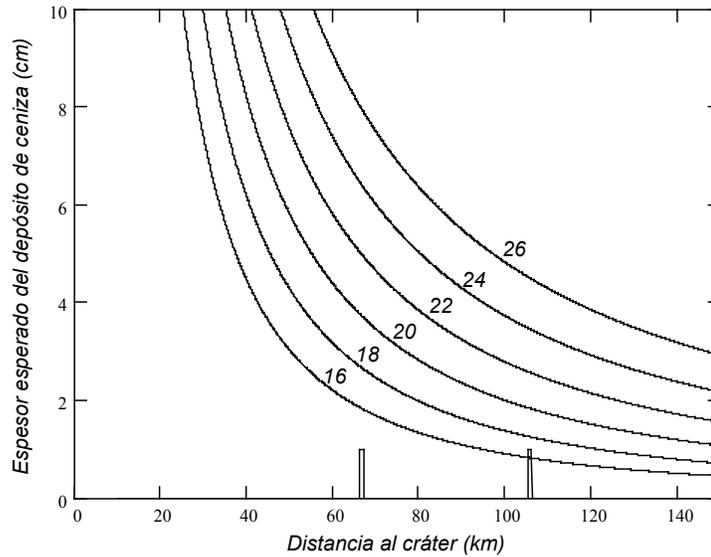


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 8$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km



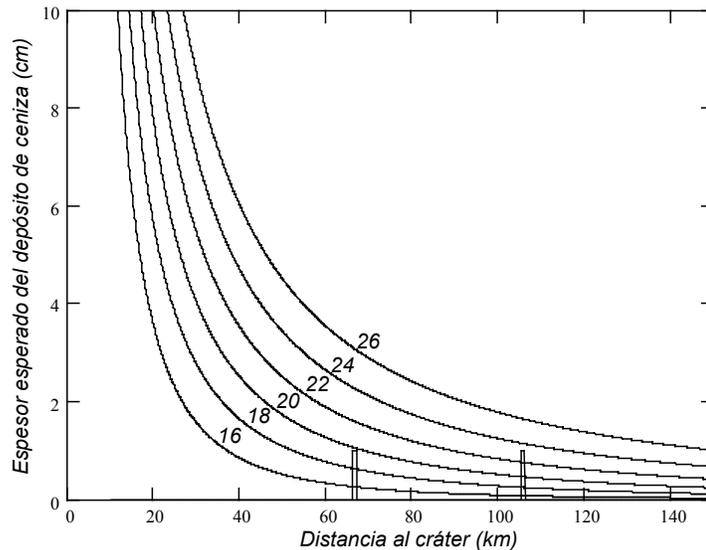
7.3.4 Escenarios de Tipo 4 ($\alpha = 15^\circ$)

Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 2$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

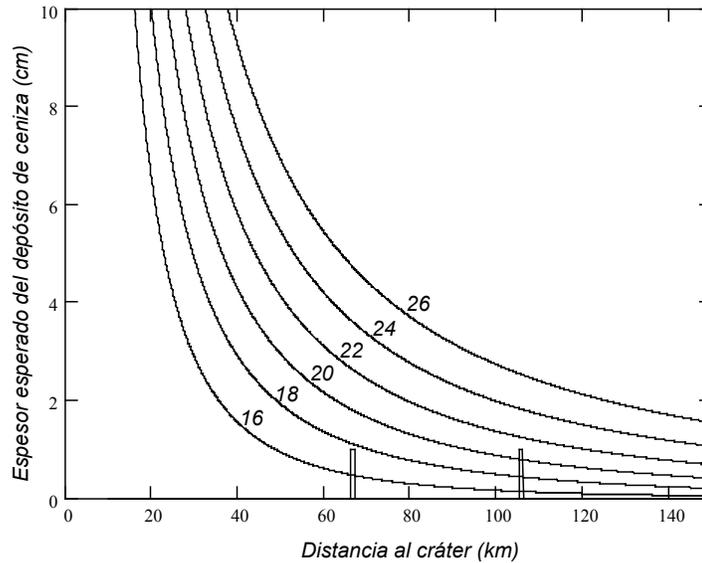


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 4$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

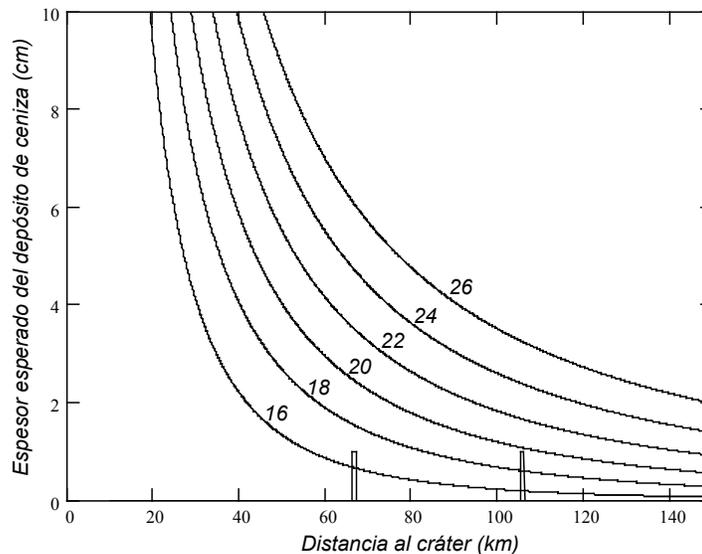


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 6$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km

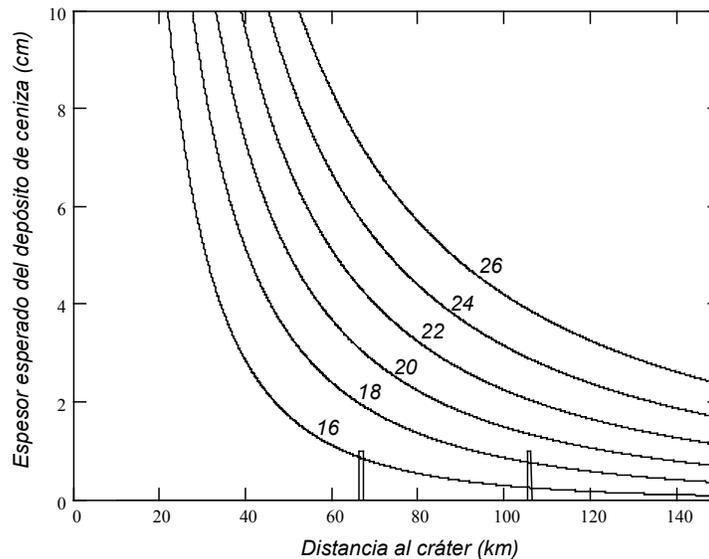


Distancia al cráter del Popocatépetl (km). Los picos representan las posiciones de los aeropuertos.

Duración de la erupción: $\tau = 8$ h

Velocidad del viento: $U = 50$ km/h

Alturas de la columna eruptiva: 16, 18, 20, 22, 24 y 26 km



7.4 Conclusiones

Debe tenerse en mente en todo momento que los resultados presentados aquí provienen de un modelo computarizado, que si bien ha demostrado su capacidad de reproducir escenarios de depósitos producidos por erupciones de diversos volcanes, no puede reproducir todos los procesos que controlan el desarrollo, dispersión y caída de las partículas que conforman una nube volcánica. Con esta limitación, pueden sustraerse algunas conclusiones acerca de los escenarios de acumulación de ceniza que podrían esperarse en las regiones de interés para diferentes tipos de potenciales erupciones del volcán Popocatépetl.

De los resultados del modelo puede concluirse que en todos los casos de escenarios de relativamente mayor probabilidad (alturas de columna menores de 15 km), los máximos espesores de ceniza depositada esperados no cambian en forma muy significativa en el rango de distancias de la región de estudio.

En los casos de relativamente menor probabilidad, correspondientes a erupciones de gran escala (i.e., alturas de columna mayores de 15 km), los espesores esperados en ambos sitios de interés impedirían por completo cualquier operación

aeronáutica. En situaciones de este tipo, puede incluso presentarse una distribución completamente distinta de los espesores de los depósitos obtenidos del modelo dado que efectos, como la agregación de partículas, no están incluidos en éste. Este tipo de efectos podría producir dos o más máximos de espesor a distancias variables del centro eruptivo. Este tipo de efectos se observaron claramente en los depósitos resultantes de la erupción del 18 de mayo de 1980 del volcán Mt. St. Helens, en el estado de Washington, en los Estados Unidos de América. La figura 1 (Carey y Sigurdsson, 1982) muestra una distribución bimodal, en la que se forma un segundo máximo del espesor de los depósitos a una distancia aproximada de 300 km del volcán.

Para precisar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de situaciones alrededor del volcán Popocatepetl, sería recomendable realizar estudios geológicos de los depósitos de materiales volcánicos de erupciones pasadas en el área de interés.

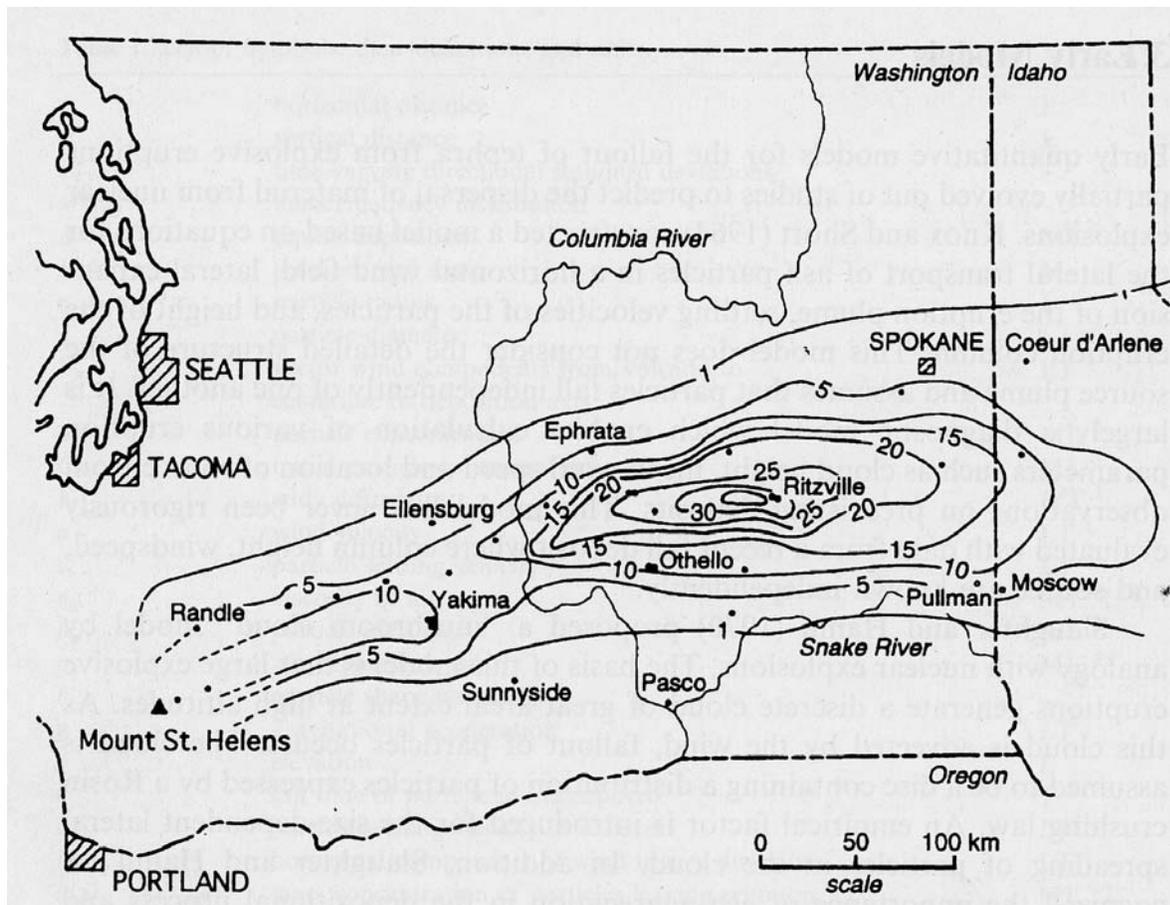


Fig. 1. Mapa de isopacas (líneas de igual espesor de ceniza depositada) de la erupción del volcán Mt. St. Helens del 18 de mayo de 1980. Los contornos están en mm. Nótese el segundo máximo a unos 300 km al ENE del volcán.

Referencias

Carey S, Sigurdsson H. (1982) Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 87: 7061-7072.

González Mellado A.O. (2000). Modelo Semiempírico de Depósitos de Caída en Volcanes. Tesis MC. UNAM. 230. pp

8. MANEJO DE CENIZAS EN OTROS AEROPUERTOS Y AEROVÍAS DEL MUNDO

Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

8.1 Riesgo para la aeronavegación

La naturaleza abrasiva de la ceniza, presenta un riesgo para cualquier sistema electrónico, de comunicaciones, de generación de electricidad y de aviones en vuelo. El comportamiento anómalo de operaciones en tierra por efecto de ceniza, incluye, aviones, computadoras, cortos circuitos, transformadores, y la red de distribución de electricidad. Lo ideal es prevenir fallas o comportamiento anómalo de estos sistemas.

8.2 Antecedentes Históricos

8.2.1 Efecto de la ceniza en aeronaves en vuelo

De acuerdo con el *United States Geological Survey* (USGS), los siguientes volcanes han sido responsables de la emisión de ceniza que ha afectado aeronaves en vuelo:

Pinatubo, Filipinas
 Sakurajima, Japón
 Pacaya, Guatamala
 Galeras, Colombia
 Spurr, (Alaska) Estados Unidos
 Lascar, Chile
 Galunggung (Java), Indonesia
 Manam, Papua Neva Guinea
 Redoubt, (Alaska) Estados Unidos de América
 Augustine, (Alaska) Estados Unidos de América
 Nyamuragira, República Democrática del Congo
 Sheveluch, Rusia

Desafortunadamente, el peligro por ceniza no sólo se localiza en las inmediaciones del volcán, ya que este material puede esparcirse a distancias considerables del volcán. Por ejemplo, la nube de ceniza que produjo la erupción del volcán Pinatubo en junio de 1991, se elevó hasta 35 km y viajó hasta 8,000 km en menos de 3 días. En el caso de la erupción del volcán Santa Elena, se considera que produjo 540 millones de toneladas de ceniza, que cayeron sobre 56,000 km².

8.2.2 Daño en vuelo

Cuando un avión moderno viaja a alta velocidad y encuentra una nube conteniendo fragmentos de ceniza volcánica, puede ocurrir una amplia variedad de daños y consecuencias, las cuales son evidentes inmediatamente. Comúnmente, la ceniza volcánica está compuesta de una mezcla de fragmentos agudos y angulares, de vidrio volcánico, así como también de fragmentos de roca y minerales, cuyo tamaño va de polvo fino a fragmentos de 3 mm de diámetro. Los fragmentos típicamente incluyen minerales de feldespato, cuarzo y piroxena. La ceniza es dura y fácilmente puede rayar y desgastar el vidrio, el plástico y los metales. Cualquier superficie de los aviones, tal como ventanillas, cubiertas de luz de aterrizaje, ejes de las alas y el fuselaje pueden ser dañadas. Debido a su tamaño minúsculo, la ceniza también puede penetrar en orificios externos del avión, incluyendo las tomas de aire de los instrumentos de vuelo, tales como los tubos pitot.

La ingestión de ceniza volcánica por las turbinas puede causar un serio deterioro en el funcionamiento de las mismas o aún provocarle una falla. De 1980 a la fecha, al menos han ocurrido siete encuentros de aviones con nubes de ceniza, que han provocado fallas temporales en las turbinas. Los procesos de deterioro que han ocurrido en las turbinas son dos principalmente: erosión de las partes móviles de las turbinas, tales como el compresor y las hojas de las turbinas así como la acumulación de ceniza parcialmente fundida en las zonas calientes de las mismas. La erosión de las hojas del compresor reduce la eficiencia de compresión de la turbina, pero aún no ha sido probado que cause falla en la misma. Los depósitos de ceniza en las secciones calientes de la turbina, incluyendo las tomas de combustible, el carburante, y la turbina, reducen la eficiencia del mezclado de combustible y restringe el paso del aire a través de la turbina. Esto causa un *surging* o incendio y pérdida inmediata de potencia de la turbina. Esta es la causa principal de la falla de turbina.

El aire que entra a la cabina del avión es tomado de la turbina. Los generadores de potencia del aire y de los sistemas neumáticos a lo largo del avión suministran el sistema de aire para los pasajeros. Este aire pasa a través de un sistema de control ambiental y es llevado por ductos a las partes apropiadas del avión. Las partículas de ceniza pueden corroer el sistema de ductos así como también ocluir el sistema de filtros diseñado para remover el polvo del aire.

Lo más difícil es evaluar el daño que ocurre por la larga exposición a las nubes de gas y también del gas derivado de las partículas que permanecen en la estratósfera. Para grandes erupciones, como las del Chichón, México en 1982 y del Pinatubo, Filipinas en 1991, los gases permanecieron suspendidos en la estratósfera por años, mucho después de que las partículas sólidas se habían asentado. El dióxido de azufre en las nubes absorbe vapor de agua y es convertido en gotitas de ácido sulfúrico (aerosoles). Cuando un avión vuela en una estratósfera contaminada con aerosoles volcánicos, estas gotitas ácidas se adhieren a las ventanillas y fuselaje del avión y pueden penetrar por las micro-fisuras de los mismos. Esto puede ser observado más fácilmente en las ventanillas de acrílico,

donde las nubes y el ácido atacan el contorno de las mismas, lo cual es evidente al momento de reemplazarlas (Rogers, 1984, 1985; Bernard y Rose, 1990).

Otros daños de corrosión en plásticos y hules usados en sellos y lubricantes, así como también en componentes metálicos usados en la estructura, no son fácilmente identificables. La identificación de daños en estos componentes puede requerir programas de inspección y mantenimiento a largo plazo. Aún mas, la corrosión debida a la contaminación volcánica puede ser difícil identificarla de otra causada por contaminación ambiental, tal como aquella debida a la sal originada por el rocío marino o gases ácidos en una zona urbana contaminada.

Como las turbinas generalmente son inspeccionadas y reconstruidas con más frecuencia que el resto del avión, los problemas de corrosión en las turbinas debidos al gas volcánico pueden ser más fácilmente identificados y corregidos durante el mantenimiento regular. Sin embargo, la estructura y fuselaje del avión son los más susceptibles a impactos de largo plazo, debido a repetidas exposiciones a las nubes volcánicas durante los vuelos. Los científicos e ingenieros aún no han estimado los efectos a largo plazo de la corrosión por componentes ácidos en nubes volcánicas.

8.2.3 Casos históricos de encuentros de aeronaves con ceniza volcánica

En 1989, el volcán Redoubt en Alaska entró en actividad eruptiva. Las erupciones mayores ocurrieron el 15 de diciembre, a las 01:40, 03:48 y 10:15 h; las dos primeras duraron aproximadamente una hora y las tres generaron grandes columnas y nubes de ceniza. Aproximadamente a las 03:50 h, un Boeing 737 fue el primer avión en encontrar una nube de ceniza del Redoubt cuando se aproximaba a Anchorage en la oscuridad en un vuelo procedente de Kotzebue, Alaska. El encuentro ocurrió cuando el avión descendió 17,000 pies de altitud con las turbinas puestas en "vuelo sin potencia". El encuentro duró 17 s y consistió en olor a gas y azufre y la aparición del Fuego de San Elmo, debido a la carga de los parabrisas de la cabina del piloto, por las partículas de ceniza. La ceniza desgastó y embotó los parabrisas, pero no redujo visibilidad significativamente. También se desgastaron ligeramente los bordes de ataque de las alas. El avión continuó su descenso para hacer un aterrizaje normal en Anchorage donde fue inspeccionado por daño. Las turbinas fueron examinadas, pero no mostraron daño y no se reemplazaron. Los parabrisas de la cabina del piloto, fueron reemplazados. La erupción mas vigorosa del 15 de diciembre, de las 10:15 a las 11:00 h aproximadamente, envió una columna de ceniza a 40,000 pies (> 12 Km). Los vientos en el nivel superior de 100 nudos transportaron esta nube de ceniza al noreste. Aproximadamente a las 11:00 h, la nube se movió por encima de las comunidades a lo largo de la carretera de los Parques al norte de Anchorage y las partículas de roca volcánica mayores que el tamaño de la arena, cayeron en Talkeetna, 225 km al nor- noreste del volcán Redoubt. Al mismo tiempo, algunos aviones se encontraban en esta vecindad y observaron la nube de ceniza en un área restringida. Un Boeing 727 de pasajeros, que había despegado del Aeropuerto Internacional de Anchorage para Betel, Alaska a las 11:25 h, encontró la nube de la erupción de las 10:15 h, mientras ascendía de 15,000 a 18,000 pies de altitud. A los 18,000 pies, el piloto informó que

había encontrado una nube de ceniza y regresó a Anchorage. No hubo ningún informe de daño por este encuentro. Al mismo tiempo, un nuevo avión de pasajeros 747-400 del vuelo 867 de KLM estaba entrando en el espacio aéreo de Anchorage por el norte.

El vuelo 867 de KLM se originó en Ámsterdam, con rumbo a Tokio. Durante el pre-vuelo, la tripulación fue informada en Ámsterdam de la erupción de la 01:40 h en el volcán Redoubt. Debido a esta erupción, se cargaron 5,000 galones adicionales de combustible al avión, en caso de ser necesaria una desviación a otro aeropuerto. El vuelo 867 partió de Ámsterdam a las 03:20 (AST) y fue programado para aterrizar en Anchorage a las 12:10 h. A bordo iban 231 pasajeros y una tripulación de 14 personas. El vuelo 867 simplemente había pasado por encima de Fairbanks a 39,000 pies en la ruta J-436, a las 11:32 h, cruzando a una velocidad de unos 490 nudos, cuando el avión empezó su descenso rumbo a Anchorage. Las transcripciones de comunicación de voz entre la Administración Federal de Aviación (FAA), el Centro de Control de Tráfico de Rutas Aéreas de Anchorage (ARTCC) y varios otros aviones en el espacio aéreo incluyendo el vuelo 867, indicaban un conocimiento del volcán Redoubt y su reciente actividad. En la vecindad del vuelo 867 de KLM, había al norte un DC-10 y un DC-8 al sur. El DC-10 se localizó aproximadamente a 30 millas náuticas (55 km) al sur de la ubicación donde el vuelo 867 encontraría la nube de ceniza. EL DC-8 se localizó aproximadamente a 12 millas náuticas (22 km) al norte de la situación del encuentro. El DC-10 estaba al norte de Anchorage sobre la ruta aérea V-438 (vía aérea de baja altitud) subiendo a 17,300 pies cuando su tripulación informó a las 11:39 h de la presencia de la nube de ceniza por encima del avión. El DC-10 continuó al norte, alcanzando 24,000 pies a las 11:45 h e informó que estaba bajo el borde norte de la nube de ceniza y a punto de pasar a un cielo claro. A las 11:41 h la tripulación del DC-8, volando al sur en la ruta aérea J-438, radió que ellos podían ver una nube al sureste a 37,000 pies. El DC-8 fue autorizado para ascender sobre la nube y a las 11:43 h habían alcanzado una altitud de 39,00 pies. Las comunicaciones entre la torre de control de tráfico aéreo de Anchorage y la tripulación del vuelo 867 durante y siguiendo los reportes de los aviones DC-10 y DC-8, dieron como resultado que el vuelo 867 virara al sureste de su ruta del vuelo normal para evitar la nube de ceniza que aún no podían identificar visualmente. A las 11:41 h, el avión de KLM fue autorizado para comenzar su transición al sureste. Aproximadamente 40 millas náuticas (75 km) después, a las 11:46 h, el vuelo 867 entró en la nube de ceniza a una altitud de aproximadamente 25,000 pies. Al entrar en la pluma, la tripulación del vuelo actuó inmediatamente para subir por encima de la nube aumentando la potencia de los reactores. Un minuto y medio después, ellos habían subido 2,900 pies más, a aproximadamente 27,900 pies, antes de que los cuatro reactores se “ahogaran”. Después de perder potencia las turbinas, el piloto viró de 140 grados en el compás magnético a 120 grados. Entre las 11:47 h y las 11:51 h, el avión se deslizó sin potencia a una altitud de aproximadamente 17,200 pies antes de que las turbinas 1 y 2, se pusieran a funcionar de nuevo con éxito. Con las turbinas 1 y 2 funcionando, el avión continuó descendiendo a 13,300 pies antes de que las turbinas 3 y 4, reiniciaran también su funcionamiento a las 11:55 h. La elevación del terreno en el área de estas maniobras tenía entre 7,000 y 11,000 pies. Después de reiniciar el funcionamiento de las turbinas, el vuelo 867 reasumió la potencia del vuelo a Anchorage e hizo un aterrizaje exitoso a las 12:25 h, 15 minutos después de la

llegada programada. El avión de KLM casi encontró directamente el borde de ataque de la nube de ceniza producida por la erupción que empezó a las 10:15 h del 15 de diciembre de 1989. En el momento del encuentro a las 11:46 h, el vuelo 867 de KLM estaba a 150 millas náuticas (280 km) al norte-noreste del volcán Redoubt. El encuentro con la nube de ceniza ocurrió 91 minutos después del comienzo de la erupción. Los vientos superiores durante la mañana del 15 de diciembre estaban previstos en 60 nudos a 24,000 pies a 210 grados; 98 nudos a 30,000 pies a 230 grados; 97 nudos a 34,000 pies a 230 grados; y 75 nudos a 39,000 pies a 230 grados. La posición del borde de ataque de la nube de ceniza estaba acorde con las velocidades de viento previstas.

8.2.3.1 Naturaleza del encuentro-reacción de la tripulación de vuelo

El plan de vuelo fue provisto por el capitán y dos pilotos más. Cuando el avión empezó su descenso aproximadamente a las 11:32 h, la tripulación reportó capas delgadas de nubes blancas al sur. Su ruta aérea (Y-436; en dirección 164 grados) los llevó al sur suroeste hacia donde sale el sol. La salida del sol en Anchorage el 15 de diciembre fue a las 10:14 h. Así, la nube de ceniza como también cualquier nube de temporal se habrían iluminado por detrás por el sol creciente. Al entrar en la nube, la tripulación informó visibilidad muy reducida y pérdida temporal de la mitad de la instrumentación de la cabina del piloto cuando las turbinas fallaron (AWST, 1990; NTSB, 1991).

Inmediatamente antes del encuentro, la tripulación informó que estaba entrando en una nube que era "un poco más café que una nube normal." Justamente después de entrar en la nube, informaron que se había ahumado la cabina del piloto y el "ambiente exterior se había vuelto negro oscuro y había partículas encendidas que parecían luciérnagas en la oscuridad." El primer oficial informó que durante el descenso del avión de 35,000 a 25,000 pies: "Debajo de nosotros había capas delgadas de nubes blancas y a aproximadamente 26,000 pies nosotros descendimos en una de aquéllas. El ambiente cambió de blanco al negro en unos segundos. El humo entró en la cabina del piloto y nosotros nos pusimos nuestras máscaras para oxígeno". El otro primer oficial observó: "Aproximadamente a 26,000 pies, descendiendo el avión, entró en lo que parecía ser una capa normal de nubes. Sin embargo, inmediatamente después de la entrada, penetró humo en la cubierta de vuelo. Las máscaras para oxígeno fueron utilizadas de inmediato y como el piloto estaba conduciendo, comencé una subida brusca para dejar la nube de ceniza."

8.2.3.2 Naturaleza del encuentro-reacción del personal de cabina

El periódico y la televisión reportaron el encuentro del KLM 867 con la nube de ceniza e incluyeron entrevistas con los pasajeros y la tripulación del avión. Estos informaron que la cabina se llenó de humo y que había un fuerte olor a azufre. Pocos minutos después de la pérdida de potencia, la actitud del avión cambió de un ascenso a una velocidad de aproximadamente 1,500 pies por minuto a un descenso por pérdida de potencia a una velocidad de aproximadamente 1,620 pies por

minuto. Inicialmente, esto causó que los objetos flotaran ligeramente en la cabina en un estado de pérdida de peso, cuando el piloto del avión maniobró para mantener la velocidad de vuelo. El interior de la cabina se puso oscura y un sentido general de miedo parecía afectar a los pasajeros y tripulación de la cabina. Varios pasajeros experimentaron náusea, que ellos atribuyeron a una combinación de olor de gas de azufre, ansiedad y la incomodidad asociada con el descenso rápido de la aeronave. No se informó de golpes u otras señales de turbulencia. Estas reacciones fueron similares a aquéllas reportadas durante el encuentro de un British Airways 747 con una nube de ceniza del volcán de Galunggung, Indonesia en 1982 (Tootell, 1985).

8.2.3.3 Daño al avión

El vuelo 867 planeó dentro de la nube de ceniza durante aproximadamente 5 minutos a una velocidad de unos 490 nudos. Durante este tiempo, la ceniza volcánica fina pudo penetrar tanto en la cabina como en las turbinas. La ceniza depositada en las turbinas, compartimiento de equipaje y cabina del avión estaba compuesta de partículas que van de menos de 1 micra hasta 100 micras en diámetro. Los filtros para el sistema del manejo aéreo ambiental no permitieron el paso de partículas mayores de 5 micras en la cabina. Las partículas colectadas en la parte externa del avión mostraron un amplio rango de tamaños (mostró) con una población sustancial de 100 micras. Las partículas obtenidas del sumidero de combustible que contuvo ceniza menor, generalmente estaban en el rango menor a 20 micras; el sistema hidráulico generalmente contuvo ceniza moderada menor a 30 micras; y el aceite de la turbina generalmente contuvo contaminación de ceniza pesada con partículas menores a 60 micras (T.M. Murray; Cía. Boeing, comunicación personal, 1990).

Las muestras de ceniza de las erupciones del 15 de diciembre colectadas en tierra, debajo del espacio aéreo del encuentro, tuvieron una masa por unidad de área de aproximadamente 500 gramos por m^3 (W. McGimsey, comunicación personal, 1990). La mayoría de las partículas en esta localidad fueron de menos de 200 micras de diámetro con aproximadamente 75% de las partículas con un diámetro medio menor a 20 micras. La ceniza estaba compuesta predominantemente por fragmentos de mineral, incluyendo el feldespato de plagioclasa, dos piroxenos (hiperstena y augita), hornblenda y óxidos de Fe-Ti, así como fragmentos de vidrio y de roca vítrea fresca y roca vieja del domo de lava pre-existente y del cuello del volcán. La roca y los fragmentos de mineral resultaron de forma angular, en bloques y típicamente cubiertos con una película delgada de vidrio volcánico vesiculado.

Debido a la naturaleza abrasiva de la ceniza, el exterior del avión y sus cuatro reactores resultaron dañados. Como se dijo antes, el daño principal a los reactores incluyó la abrasión de las hojas del compresor, acumulación de ceniza en el combustor, y acumulación de ceniza refundida a la entrada de la sección de turbina (Casadevall et al., 1991; Przedpelski y Casadevall, 1991) que eventualmente causó que fallaran todas las turbinas. Después del aterrizaje exitoso en Anchorage, el avión se mantuvo en tierra durante dos meses, para efectuar las reparaciones

necesarias. Todas las turbinas fueron reemplazadas antes de que el avión volara de nuevo.

Además de las turbinas, los instrumentos y sistemas eléctricos del avión se dañaron y también se reemplazaron numerosos componentes (Campbell, 1991a). La abrasión por la ceniza también dañó los parabrisas de la cabina del piloto y las ventanas de la cabina delantera, los bordes de ataque de las alas, el timón de cola, los cowlings de las turbinas, las cubiertas de fibra de vidrio para los tornillos de los alerones y el cono de nariz del radar. Las cubiertas para las luces de navegación y aterrizaje también resultaron muy desgastadas. El sistema de tubo pitot, para medir la velocidad del avión mientras esta en vuelo, también fue tapado por la ceniza. Se contaminaron con ceniza el aceite de los motores, el fluido hidráulico, el suministro de agua potable, el sistema de control ambiental y los ductos de ventilación, por lo cual fueron reemplazados. Los accesorios de la cabina, el alfombrado, las cubiertas de los asientos y los cojines también fueron contaminados, por lo que tuvieron que ser limpiados.

El costo total por daños a este casi nuevo avión 747-400 fue estimado inicialmente entre 50 y 80 millones de dólares (AWST, 1990; Steenblik, 1990).

8.2.3.4 Causa probable del encuentro según la NTSB (National Transportation Safety Board)

Debido a que el vuelo 867 de KLM perdió potencia en sus reactores mientras volaba, el piloto fue exigido a archivar un informe del incidente con la FAA y con la Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) para investigar y determinar la causa probable del incidente. El NTSB encontró la causa probable y la hizo pública en julio de 1992 y se cita aquí literalmente:

“La Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) determina que la(s) causa(s) probable(s) de este accidente/incidente fue: Un encuentro inadvertido con una nube de ceniza volcánica, la cual dio como resultado un daño extraño (objeto extraño) y como consecuencia el compresor de las turbinas dejó de funcionar. Un factor relacionado con el accidente fue: la falta de información disponible sobre la nube de la ceniza a todo el personal involucrado.”

8.3 Efecto de la Ceniza en Aeropuertos

Los aeropuertos son instalaciones complejas, de gran tamaño y con responsabilidades jurídicas de muchos niveles. En cualquier aeropuerto hay varias instancias de autoridad y responsabilidades, que al momento de una crisis pueden traslaparse y en algún momento, hasta entrar en conflicto.

Un factor importante que hay que considerar es la jurisdicción de los servicios. Por ejemplo, todo lo que tiene que ver con aterrizajes, es controlado por una institución, mientras que cada aerolínea tiene sus propios sistemas de cómputo y controla todo su apoyo y servicios de mantenimiento. Con respecto a una contingencia por

presencia o caída de ceniza, debe reconocerse que existen todos estos servicios y que se debe tener un plan de contingencia que ayude a los diversos grupos a actuar juntos.

El problema de la ceniza en aeropuertos, no es nuevo, ha existido desde hace muchos años. Actualmente representa un riesgo mayor, debido a la cantidad de aeronaves que vuelan diariamente. A continuación se muestra una tabla con algunos de los aeropuertos afectados por ceniza volcánica en el mundo.

Aeropuertos Afectados por Caída de Ceniza Volcánica

Fecha	Ciudad/ Aeropuerto	Volcán	Cantidad de ceniza	Días cerrado	Comentario	Referencia
24/05/24	Kilauea	Kilauea	Bloques	?		Blong, 1984
22/03/44	Nápoles	Vesuvio	?	?	88 aviones dañados	Lloyd, 1990
21/01/51	Port Moresby	Lamington	?	?		Taylor, 1958
09/07/53	Anchorage	Spurr	3-6 mm	4-7		Juhle y Coulter, 1955; Wilcox, 1959
17/03/63	Surabaya	Agung	<10 mm	1		Jennings, 1969; Suryo, 1981
09/09/71	Kagoshima	Sakurajima	3 mm	<1		Kamo, 1993
23/01/76	Anchorage	Augustine	Traza	cancelaciones		Kienle y Swanson, 1985
03/08/79	Catania	Etna	Traza	1-?		Guest, 1980
18/05/80	Spokane, Yakima, Pullman, Grand Country, Missoula, MT	Mt. St. Helens	0.5-1 cm 0.5-1 cm 1 cm 7-9 cm 1-2 cm	3 7 7 15 varios		Schuster, 1981,83 Warrick, 1981
25/05/80	Portland	Mt. St. Helens	Traza (<0.1 cm)	Cancelaciones		Schuster, 1983
12/06/80	Pórtland	Mt. St. Helens	2-3 mm	Varios	Algunas compañías continuaron operando	Schuster, 1983
1982	Bandung	Galunggun g	Varios	Varios, incluyendo del 4 al 21 de junio	Cerrado por reducción de visibilidad	De Neve, 1986
03/10/83	Miyake-Jima	Miyake- Jima	10 cm	4		Blong, 1984
1984	Anchorage	Augustine	Traza	Cancelaciones		Kienle y Swanson, 1985
15/12/89 y 21/02/90	Anchorage	Redoubt	Traza	Cancelaciones	Ceniza en el espacio aéreo y varios encuentros	Casadevall, 1993

Fecha	Ciudad/ Aeropuerto	Volcán	Cantidad de ceniza	Días cerrado	Comentario	Referencia
08/01/90	Kenai, Alaska	Redoubt	5 mm	Varios		Casadevall, 1993
11/03/90	Kagoshima	Sakurajima	2 mm	<1		Kamo, 1993
16/04/91	Colima, México	Colima	< 5 mm	Varios		Bull. Global Vol. (1991, v16, n4)
15/06/91	Manila Sagley Pt. Cubi Pt. Clark Basa Legaspi Pt. Princesa	Pinatubo	0.5-1 cm 0.5-1 cm 15-20 cm 15-20 cm 15-20 cm traza traza	Varios		Casadevall
Ago-Dic, 1991	Argentina: Pto. Deseado y Stanley, Islas Flakland	Hudson	Variable		Principal problema, ceniza en el aeroespacio	Manzanares, 1991
24/10/91	Medan	Lokon	Sin ceniza	Varios	Ceniza en aeroespacio	Pardyanto, 1991.
06/06/92	Kagoshima	Sakurajima	<1 mm	1		Kamo, 1993
18/08/92	Anchorage	Spurr	<5 mm	3		AVO, 1993
18/04/93	Argentina: Salta, Jujuy y Cordoba	Lascar	Varios	Varios	Ceniza en Asunción	Pequeño, 1993.
07/06/93	Pasto	Galeras	Traza	<1	NOTAM a las 12:15pm	Bull. Global. Vol (v.18, n5)
30/07/97	Cd. de México	Popocaté- petl	Traza	< 1	Ceniza en pistas	

8.4 Manejo de Cenizas en Otros Aeropuertos del Mundo

Debido a que la erupción del volcán Redoubt (1989-1990) en Alaska, fue muy bien documentada, se ha tomado del artículo de Thomas J. Casadevall los siguientes puntos como un caso típico del cual se pueden aprender varias lecciones.

8.4.1 Efectos en las operaciones aeroportuarias en la región de Anchorage y Kenai

Las nubes de ceniza del volcán Redoubt interrumpieron el funcionamiento de los tres más grandes aeropuertos que sirven en el área Anchorage. Debido a los diferentes tipos de aviación y servicios ofrecidos en cada aeropuerto, la severidad del impacto en el funcionamiento del aeropuerto por la actividad del Redoubt varió de aeropuerto a aeropuerto. Es importante recordar que no hubo ningún espesor significativo de ceniza caída en Anchorage durante las erupciones del Redoubt en 1989-1990, en contraste con la erupción del Mt. Spurr en 1953 que depositó de 3 a 6 mm de ceniza en Anchorage y causó que los aeropuertos de Anchorage y Elmendorf cerraran durante varios días (Juhle y Coulter, 1955).

Una lluvia ligera de ceniza cayó en Anchorage el 15 y 16 de diciembre de 1989 y el 28 de febrero de 1990; la ceniza cayó en un área al sur de Anchorage el 21 de febrero de 1990. Así, la ceniza no cayó en los aeropuertos, pues tendrían el mayor impacto sobre las operaciones de vuelo, pero esta flotó y contaminó el espacio aéreo de la Región de Información de Vuelo de Anchorage. El aeropuerto de Kenai, localizado en la Península de Kenai, 43 millas náuticas (80 km) al este del volcán Redoubt, estaba cerrado por caída de ceniza de la erupción del 8 de enero y permaneció cerrado durante varios días.

8.4.2 Campo Merrill, Anchorage

El Campo Merrill en Anchorage es operado por la Municipalidad de Anchorage y maneja la mayoría de la aviación general basada en tierra y el tráfico aéreo de fletes en el área del Anchorage. Un volumen más pequeño de tráfico privado y de fletes se maneja en Lake Hood, que es una instalación para hidroaviones y esquí, inspeccionada por el Aeropuerto Internacional de Anchorage. Aproximadamente 950 aviones tienen su base en el Campo Merrill y había unas 230,000 operaciones aéreas en este campo durante 1989 (B. Myers, Municipalidad de Anchorage, comunicación personal, 1990). Éstos incluyen a la vez aviones de ala fija y helicópteros que usan pistón o reactores de turbohélice. Otra suspensión temporal de algunos servicios durante mediados de diciembre incluyeron los servicios de renta aérea fletada a Beluga, 35 millas náuticas (65 km) al oeste de Anchorage. Aquí fue despreciable el impacto sobre las operaciones del Campo Merrill debido a las erupciones del Redoubt. La ceniza que cayó en el Campo Merrill y en Lake Hood molestaba principalmente a los operadores de aviones pequeños ya que tenían que cepillar la ceniza de las superficies de sus aviones. Muchos dueños evitaron el problema cubriendo sus aviones simplemente con cubiertas antes de que cayera la ceniza.

8.4.3 Base de la Fuerza Aérea en Elmendorf, Anchorage

La base de la Fuerza Aérea en Elmendorf, Anchorage, maneja una variedad de aviones militares que va desde los aviones de combate a reacción hasta los de carga y transporte de tropas y aviones de turbohélice. Los reportes de periódico (Anchorage Times 12/24/89) indican que durante diciembre la base aérea usó un avión turbohélice (C-12) para monitorear la actividad volcánica y el movimiento de la pluma, agregando aproximadamente 12 salidas en operaciones normales diarias. Éste avión sólo voló durante el día mediante Condiciones de Vuelo Visual (VFR) y suministró información de clima y reportes del piloto para las operaciones militares. Las operaciones del avión de combate a reacción fueron limitadas durante el 15 y 16 de diciembre y 12 salidas fueron canceladas. Durante diciembre, aproximadamente se desviaron 90 vuelos militares de carga a Fairbanks o a la Base Aérea de la Guardia Nacional en el Aeropuerto Internacional de Anchorage (AIA). Se cancelaron aproximadamente 45 vuelos militares de avión de turbohélice en diciembre de 1989 debido a la actividad volcánica.

8.4.4 Aeropuerto Internacional de Anchorage

El Aeropuerto Internacional de Anchorage es la principal instalación aeroportuaria en Alaska. Desde el advenimiento del avión de pasajeros con motor a reacción hace más de 30 años, Anchorage ha llegado a ser una parada importante para recargar combustible y cambiar tripulaciones en las rutas aéreas transpolares del gran-círculo entre América del Norte y Europa con el Oriente. Además, hay un uso creciente de Anchorage como un depósito de carga aérea y como un destino para el tráfico turístico internacional, sobre todo en los meses de verano. AIA es operado por el Departamento de Transporte e Instalaciones Públicas del Estado de Alaska y maneja la mayoría del tráfico aéreo doméstico e internacional del Estado, incluyendo las operaciones de pasajeros y carga. En 1989, el aeropuerto de Anchorage daba servicio a 26 aerolíneas, incluyendo 14 internacionales y 12 domésticas.

En diciembre de 1989 y en enero de 1990, los aviones de pasajeros y los operadores de carga aérea disminuyeron significativamente su funcionamiento debido a las erupciones de volcán Redoubt. Sus efectos incluyeron la cancelación de vuelos, cambios de rutas de vuelo, pérdida de rentabilidad por cuotas de aterrizaje, recorte de tarifas, de tarifas de carga de combustible y cuotas por el uso del área de aduanas de los Estados Unidos, y pérdida de cuotas por concesión para tiendas libres de impuestos y servicios de restaurante. El total de desembarcos internacionales y domésticos en el AIA en diciembre de 1989 estaban por debajo aproximadamente 10% comparado con diciembre de 1988. La pérdida de rédito resultante a partir de las operaciones recortadas en el Aeropuerto Internacional de Anchorage durante varios meses después de la erupción, fue estimada en aproximadamente \$2.6 millones de dólares (K. Burdette, Aeropuerto Internacional de Anchorage, comunicación personal, 1990).

8.4.5 Información del Observatorio Vulcanológico de Alaska

El monitoreo de la actividad de los volcanes de Alaska es responsabilidad del Observatorio Vulcanológico de Alaska (AVO), establecido en 1988 como un programa cooperativo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska-Fairbanks y de la División Alaska del Servicio Geológico y Geofísico en Fairbanks. La oficina en Anchorage de AVO es el componente principal de AVO que actúa recíprocamente con agencias de aviación. Esto facilita las comunicaciones con el FAA, con el Centro Regional de Mando de Tráfico Aéreo (ARTCC), con el Servicio Nacional del Clima (NWS), con el Consejo de Seguridad de Transporte Nacional, así como con las 26 líneas aéreas que utilizan la AIA. En la región de Alaska, el NWS y FAA-ARTCC proporcionan oportunamente informes de clima y comunicación a los pilotos, considerando la actividad eruptiva. Durante la erupción, representantes de más de la mitad de las compañías transportistas, así como los miembros de las agencias Federales y de las comisiones del Congreso, frecuentemente visitaron la oficina de AVO en Anchorage para tener sesiones de información sobre la erupción y para ver qué información confiable podrían recibir de AVO. Este contacto directo entre la aviación interesada y los científicos de AVO fue importante para encuadrar la información de

comunicación a las necesidades de la comunidad de aviación, en términos del contenido de mensaje, idioma utilizado y frecuencia de actualización. Las discusiones con los despachadores de la aerolínea y las encuestas de investigación de las compañías indicaron que la comunicación oportuna de información verdadera sobre el estado del volcán Redoubt era el elemento más importante para definir una respuesta al aviador, respecto de las erupciones.

Para informar a las agencias gubernamentales, al público, y a la comunidad de aviación, fueron desarrollados cuatro tipos de información sobre el estado del volcán Redoubt por el Observatorio Vulcanológico de Alaska durante la actividad de 1989-1990. Esta información se envió directamente a la FAA, al NWS, y a los oficiales del Aeropuerto Internacional de Anchorage y de la base aérea de Elmendorf. Inmediatamente después de comenzar la actividad en diciembre de 1989, el AVO empezó a emitir una declaración impresa, con la actualización de la actividad del volcán, la cual fue emitida una o más veces por día y donde se describe el estado del volcán, sus erupciones, actividad sísmica y los eventos volcánicos relacionados con flujos de lodo y avenidas de agua. En enero de 1990, se proyectó un Mapa de Trayectorias de Pluma donde se muestra cómo una nube de ceniza podría ir durante las próximas 24 h, el cual fue incluido con la actualización de la actividad del Volcán (Murray et al., 1991). Estos mapas se produjeron en AVO utilizando datos de predicción de vientos proporcionados por el Servicio Nacional del Clima. En febrero de 1990, AVO complementó la actualización con un Código de Colores para indicar el nivel de inquietud basado principalmente en la actividad sísmica y en observaciones de campo. El sistema de Código de Colores fue introducido para describir más fielmente el estado del volcán cuando una erupción estaba en marcha o cuando estaba a punto de ocurrir (AVO, 1990; Brantley, 1990). El código usó cuatro colores que fueron verde (volcán en reposo o dormido = nivel bajo de inquietud), luego amarillo, posteriormente naranja, y al último rojo (erupción en progreso = nivel alto de inquietud) para representar la inquietud o preocupación sobre el comportamiento del volcán.

Se publicaron la actualización de la actividad del volcán, el Mapa de Trayectorias de Plumas y el Código de Colores regularmente cada mañana durante la erupción. Podrían emitirse cambios en esta información a cualquier hora durante las 24 horas del día, dependiendo de la actividad del volcán. Una vez que una erupción era identificada, la nueva información se emitía como una Notificación de Alerta de Evento y era comunicada inmediatamente por teléfono a la FAA, al NWS, a la Sección de Servicios de Emergencia de Alaska y a la Fuerza Aérea Norteamericana. Para apresurar la transmisión de la Notificación de Alerta de Evento, AVO, la FAA, y las compañías de transporte acordaban la siguiente breve declaración.

“Ésta es una notificación de erupción del Observatorio Vulcanológico de Alaska. Los datos sísmicos indican que una (Pequeña, Moderada, Grande) erupción del volcán Redoubt comenzó a las -AST (-Z) el - (fecha). El nivel del código de inquietud es rojo” .

El Aeropuerto Internacional de Anchorage y las aerolíneas normalmente recibieron información de AVO a través de la FAA y ARTCC. Simultáneamente, una revisión

actualizada fue enviada por facsímil telefónico a una amplia comunidad de usuarios. Para manejar la gran cantidad de llamadas telefónicas en la oficina de AVO-Anchorage, se establecieron “hot lines” con mensajes grabados. Los números de teléfono separados eran para los medios de comunicación y para la comunidad de aviación. Se pusieron al día los mensajes grabados en las “hot lines” con la situación del volcán cuando cambiaba. Las personas que llamaban para pedir información adicional dejaban un mensaje grabado que era contestado por miembros del personal de AVO cuando el tiempo y su trabajo se los permitía.

El Evento de Notificación de Alerta normalmente requería de todos los responsables de las aerolíneas para comenzar su contestación a una erupción. Cada uno trató de informar sobre el volcán de una manera diferente. Algunos vuelos cambiaron de ruta en el aire; otros usaron sus propios datos de viento-velocidad para calcular trayectorias de la pluma y alteraron su curso de acuerdo con ello; otras compañías con vuelos en los límites de Alaska cargaron combustible extra para anticiparse a la posible desviación y otros más confiaron en los directores de la FAA para recibir sus consejos respecto de las acciones a seguir.

8.4.6 Procedimientos adoptados por las aerolíneas

Durante las erupciones de 1989-1990 en el volcán Redoubt, cada una de las 26 compañías de transporte en el Aeropuerto Internacional de Anchorage adoptaron procedimientos para tratar con la situación cambiante presentada por el volcán. Estos procedimientos fueron desde la cancelación de todas las operaciones de vuelo para períodos de varios días hasta varias semanas, al cambio de ruta del tráfico aéreo en el Gran-Círculo para hacer escalas en Fairbanks y Vancouver, Canadá, para cambiar las rutas y volar por encima del espacio aéreo ruso y evitar el área de riesgo. Los vuelos domésticos con base en Alaska, tales como Aerolíneas de Alaska, Reeve Aleutian, y Markair continuaron operando en sus horarios normales, sólo con cambios menores. Las compañías con base fuera de Alaska y servicio menos frecuente, fueron más conservadoras. Ellas, normalmente evitaron el espacio aéreo de Anchorage hasta que estuvieran bastante seguros de que el volcán no presentaría ningún problema.

Como la actividad del Redoubt continuó hasta 1990, los procedimientos de operación de la aerolínea evolucionaron en respuesta a un mejor entendimiento sobre el volcán, al mejor monitoreo del volcán y a la mejor comunicación de información sobre las erupciones. Los cambios de procedimiento normalmente comenzaron mediante reuniones abiertas entre representantes de las aerolíneas, de las agencias de operaciones aéreas (AIA, FAA, NWS, USAF) y científicos del AVO.

Desde los comienzos de la actividad a mediados de diciembre de 1989 y hasta febrero de 1990, el flujo de información hacia las compañías aéreas sobre el volcán siguió un protocolo normal. Típicamente, la oficina del Observatorio Vulcanológico de Alaska en Anchorage proporcionaba la notificación de la erupción a la FAA (ARTCC) y al Servicio Nacional del Clima (NWS) en Anchorage. Esta información fue retransmitida por estas agencias a las líneas aéreas a través de los

procedimientos del NOTAM (Aviso a Aviadores) y SIGMET (Evento Meteorológico Significativo) (ver Servicios de Clima para Aviación, 1985). Sin embargo, como los NOTAMs requirieron la aprobación previa antes de la emisión, se retardaron en llegar al usuario hasta por más de 90 minutos. Las líneas aéreas estuvieron inconformes con esta pérdida de tiempo en la información en las regiones ya mencionadas para esta asesoría, por lo que ya en diciembre, ellos comenzaron a desarrollar sus propias vías de acceso para tratar con el problema de la ceniza volcánica (Haeseker, 1991). Compañías individuales tales como Alaska Airlines y Markair establecieron esquemas de rastreo confiando en las actualizaciones de AVO y en las notificaciones telefónicas de AVO a través de la FAA. Siguiendo la notificación del evento, varias aerolíneas desarrollaron métodos para rastrear el movimiento de las nubes de ceniza utilizando la información sus propios pilotos (PIREPS) más la de otras compañías. Estos procedimientos ganaron popularidad con las líneas aéreas y para el 2 de marzo de 1990 las compañías aéreas y la AIA formalizaron este sistema como un respaldo a los procedimientos normales de FAA-NWS. Dos compañías, Markair representando a las líneas aéreas domésticas y Japan Airlines representando a las internacionales, fueron elegidas por el consejo de operadores del AIA para tomar la responsabilidad de informar a las otras compañías sobre la actividad del volcán Redoubt.

8.4.7 Aerolíneas de Alaska

En diciembre de 1989, Aerolíneas de Alaska, con la mayor frecuencia de operaciones en el Aeropuerto Internacional de Anchorage, operó aproximadamente 48 vuelos de pasajeros por día, o aproximadamente el 20% del total de vuelos domésticos. Con las erupciones del 15 y 16 de diciembre, Aerolíneas de Alaska, y todas las demás compañías cancelaron temporalmente todos sus servicios en el AIA. Para el 17 de diciembre, Aerolíneas de Alaska evaluó su situación de cancelación de vuelos y determinó si podrían reasumirlos con poco o ningún riesgo. Para el 19 de diciembre, esta aerolínea había reanudado su horario normal (Haeseker, 1991).

Los oficiales de Aerolíneas de Alaska indicaron que su descontento con la información disponible para el funcionamiento aérea los llevó establecer su propio sistema de sentido común por tratar con el problema de la ceniza volcánica. Primero, ellos encontraron que los datos de predicción de vientos eran ocasionalmente incorrectos con respecto a la dirección y velocidad. Así, para sus propósitos, proyectando el movimiento de la nube de ceniza con base en los datos de viento no eran suficientemente confiables. Segundo, ellos fueron escépticos respecto de los NOTAMs y SIG-METs sobre la actividad volcánica ya que esta información no tenía fecha y a menudo permanecía "en el sistema" hasta por 36 horas, luego de que un evento volcánico había terminado. Tercero, ellos llegaron a vacilar en aceptar informes de los pilotos, recibidos a través de los cauces normales de la FAA, ya que esto no se hacía de una manera uniforme. Cuando la erupción ocurrió desde mediados de diciembre a principios de enero, era claro que para un piloto era una "erupción mayor" y para otro era una "nube de vapor".

Para aclarar esta situación, las Aerolíneas de Alaska desarrollaron su propio sistema basado en el concepto de “equipo en su sitio” (Haeseker, 1991). Los elementos clave que hicieron del sistema un éxito en Alaska Airlines fueron: 1) comunicaciones verbales claras y directas entre el personal de operaciones de vuelo en Anchorage; 2) informes directos de los pilotos de Aerolíneas de Alaska en el aire; 3) reuniones cuidadosas con las tripulaciones aéreas recién llegadas y con las que iban a iniciar el vuelo. Este procedimiento normalmente comenzó con la información actualizada recibida del AVO, respecto de la actividad diaria del Redoubt. Antes del 2 de marzo, esta actualización llegó normalmente de AVO vía la FAA, y después de esta fecha, también llegó de AVO, pero vía el AIA. Las preguntas respecto de la actividad fueron normalmente resueltas mediante una llamada telefónica de las Aerolíneas de Alaska a las oficinas de AVO en Anchorage. Los materiales visuales en el Centro de Operaciones de las Aerolíneas de Alaska en Anchorage, incluyeron una carta aeronáutica de la región, resaltando de forma prominente las rutas aéreas y la posición de la nube de ceniza y su movimiento esperado. La compañía desplegó datos de velocidad de viento y se discutieron los informes de sus pilotos por personal de operaciones de vuelo, incluyendo a las tripulaciones y despachadores.

8.4.8 Sistema Ordenador del Transporte

En respuesta a la necesidad de diseminar más rápido la información entre las líneas aéreas en el Aeropuerto Internacional de Anchorage, el Sistema Ordenador del Transporte entró en vigor el 2 de marzo de 1990. El propósito de este sistema era asegurar la diseminación rápida de información relativa al volcán a todas las líneas aéreas que operan en el Aeropuerto Internacional de Anchorage. El inicio de este sistema comenzó con una notificación inicial de evento por el Observatorio Vulcanológico de Alaska, la FAA, o el Servicio Nacional del Clima al AIA, el cual a su vez notificó a dos representantes de compañías en el AIA, que a su vez notificaron a cada una de las compañías de transporte en el aeropuerto de Anchorage. El Sistema Ordenador del Transporte era similar en muchos aspectos al “equipo en su sitio” desarrollado por Aerolíneas de Alaska y era confiado para rastrear visualmente la nube de ceniza volcánica a través de los reportes de los pilotos. Sin embargo, en contraste con el sistema de Alaska Airlines, la información recogida por el sistema ordenador fue compilada por Markair y Japan Airlines en informes concisos que fueron enviados inmediatamente por teletipo a las otras compañías y demás interesados de aviación utilizando el sistema de comunicación SITA (Sociedad Internacional de Telecomunicación Aeronáutica). El informe también fue a los destinatarios seleccionados en la Red de Telecomunicación Aeronáutica Fija (AFTN), un sistema de comunicación mundial manejado por la Organización Internacional de Aviación Civil para comunicación entre las instalaciones de control del tráfico aéreo, incluyendo a las instalaciones militares de los Estados Unidos. El sistema ordenador continuó en operación hasta que la nube de ceniza se movió más allá del área de tráfico aéreo o cuando el contenido de ceniza de la nube disminuyó de tal manera que el rastreo visual ya no era posible. En la práctica esto significó un periodo de vigilancia de aproximadamente cuatro a seis horas, durante las cuales se podrían emitir unos 10 mensajes sobre la actividad.

8.4.9 Discusión y Recomendaciones Recomendaciones como resultado de la actividad del volcán Redoubt

Debido a una única combinación de rutas aéreas ocupadas, proximidad a un aeropuerto internacional grande y a un extenso periodo de actividad eruptiva, las agencias de aviación en Anchorage desarrollaron una gama de esquemas de respuesta durante las erupciones de volcán Redoubt en 1989-1990. Éstos señalaron serias limitaciones en la manera de monitorear los volcanes; modos en que las nubes de ceniza son detectadas y rastreadas; maneras en que la información crucial es comunicada y finalmente las formas en que los pilotos manejan esta información cuando su avión se encuentra dentro de una nube de ceniza. Muchas de las limitaciones, problemas técnicos y lecciones aprendidas en el volcán Redoubt fueron discutidos en un Simposio Internacional sobre Ceniza Volcánica y Seguridad de Aviación, realizado en Seattle, Washington en julio de 1991 (Casadevall, 1991).

8.4.10 Problemas Técnicos

Una vez que el volcán había hecho erupción, tres agencias se interesaron en encarar el desafío técnico a fin de dar una notificación exacta de las erupciones para propósitos de seguridad aérea. Éstas son: (1) verificación de que la nube eruptiva lleva ceniza, (2) determinación de altitud de los techos de las nubes de ceniza; y (3) predicción de trayectorias de las nubes de ceniza y sus proporciones.

Irónicamente, aunque la comprobación de que las nubes eruptivas llevan ceniza y la determinación de sus techos son problemas que han sido resueltos durante las erupciones de los últimos 25 años, estos métodos no estaban disponibles para aplicarse en el volcán Redoubt en 1989. Por ejemplo, durante las erupciones de 1965-1968 en este volcán, se obtuvieron alturas exactas de la nube eruptiva utilizando un sistema de radar para clima de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, localizado en Kenai (Wilson et al., 1966; Wilson y Forbes, 1969). Actualmente en Alaska no hay instalaciones que proporcionen servicios de radar para clima, del tipo y calidad anterior, como el de la instalación de Kenai. Análogamente, en el Monte Santa Helena en 1980 y 1982, el radar para clima de la FAA instalado en el aeropuerto de Portland se adaptó con éxito para definir las plumas eruptivas (Harris et al., 1981; Harris y Rose, 1983).

8.4.11 Techos de la nube de ceniza

Durante la actividad del Redoubt de 1989 a 1990, los informes de los pilotos fueron la fuente principal de información sobre la altitud máxima de los techos de las nubes de ceniza; éstos iban de los 40,000 a los 45,000 pies. Para varias erupciones del Redoubt, las imágenes de infrarrojo de un satélite militar con órbita polar registraron la temperatura mínima de los techos de la nube. Con este instrumento se suministró y previno que los datos del perfil temperatura-altitud de la atmósfera local podrían usarse para determinar la altitud del techo de la nube. Sin embargo, tales datos del satélite de infrarrojo estaban disponibles para sólo unas cuantas erupciones.

conviene aclarar que y el perfil temperatura-altitud para la atmósfera de Alaska, en tiempo invernal, típicamente incluye una inversión de temperatura a aproximadamente 37,000 pies, una altitud donde opera la mayor parte del tráfico aéreo con motor a reacción. La inversión de temperatura llevó a alguna ambigüedad en la determinación de techos de nube. Por ejemplo, el 8 de enero, la temperatura del techo de la columna eruptiva fue de -56 grados centígrados, que era equivalente a una altitud de 37,000 pies o 30,000 pies, dependiendo de si la nube eruptiva estaba arriba o abajo de la inversión en el perfil de temperatura-altitud. Independientemente, un avión de investigación voló brevemente debajo de la nube el 8 de enero después de la erupción y detectó los bordes de la nube a aproximadamente 37,500 pies utilizando un lidar a bordo. Sin embargo, como la nube de ceniza era tan densa, la señal del lidar no pudo penetrar y descubrir el techo máximo de la nube (Hobbs et al., 1991).

8.4.12 Ceniza en las nubes volcánicas

Durante las erupciones del volcán Redoubt en 1989 a 1990, el mal tiempo y la oscuridad a menudo evitaron la observación directa de las erupciones. En estas ocasiones se utilizaron las señales sísmicas de los sismómetros ubicados en el volcán para indicar cuándo estaba ocurriendo una erupción. Sin embargo, los registros sísmicos no permitieron a los científicos determinar si el evento sísmico había producido una nube de ceniza.

Los observadores de las nubes de ceniza, producidas durante las erupciones de mediados de diciembre y del 2, 8 y 16 de enero, informaron de la ocurrencia de relámpagos en estas nubes. La acumulación de carga eléctrica en las nubes de ceniza; es una característica común de muchas erupciones volcánicas, aunque se ha efectuado poca investigación respecto de estos fenómenos (Gilbert et al., 1991). El aumento de carga ocurre al parecer cuando las partículas chocan entre sí dentro de una nube eruptiva turbulenta. Combinando el monitoreo con la detección de relámpagos, ofrece la posibilidad de detectar nubes ricas en ceniza y distinguirlas de las emisiones simples de vapor, las cuales normalmente están libres de ceniza. En 1990, un sistema de detección de relámpagos operado en Alaska por la Oficina para el Manejo de Tierras para monitorear los incendios forestales, fue adaptado con éxito para el rastreo de las nubes de ceniza del volcán Redoubt.

8.4.13 Trayectorias de las nubes de ceniza

Es de gran importancia tanto para los servicios aéreos como para los municipales de tierra, incluyendo el transporte de superficie, hospitales, y medios militares, contar con un sistema de advertencia temprana de caída de la ceniza. Para predecir la trayectoria de la nube de ceniza, se desarrolló un procedimiento simple usando datos de pronóstico de vientos para las erupciones del Monte Santa Helena en 1980 (Smith, 1980; Miller et al., 1981), el cual se adaptó para usarse en el volcán Redoubt en 1990 (Murray et al., 1991). Las gráficas de predicción de trayectorias tienen la ventaja de que están disponibles antes de una erupción, sin embargo, ellas no proporcionan información sobre el contenido de ceniza de la nube ni de la

proporción que va dejando en su trayectoria. Los modelos de trayectoria de ceniza preparados por el Laboratorio de Recursos del Aire del NOAA para el volcán Redoubt que usó datos precisos de pronóstico de viento en el momento de las erupciones de diciembre, indicaron la posición y tiempo cuando la nube pasó por encima del oeste de Estados Unidos y por el occidente de Texas (Heffter et al., 1990).

Las imágenes de satélite, sobre todo las de las plataformas geoestacionarias, se han utilizado para rastrear las nubes de ceniza y para medir su proporción de movimiento horizontal (Hanstrum y Watson, 1983; Malingreau y Kaswanda, 1986; Sawada, 1987, 1989). Sin embargo, aún es difícil distinguir entre nubes de ceniza y de vapor de agua usando imágenes de satélite convencionales (Sawada, 1989). Un problema adicional para la región de Alaska es que sólo están disponibles satélites de órbita polar para vigilancia.

8.4.14 Comunicaciones

Las nubes de ceniza pueden viajar lejos de su fuente y a menudo por encima de límites internacionales, es esencial tener comunicación rápida entre las Regiones de Información de Vuelo, respecto de los riesgos volcánicos. La nube eruptiva del 15 de diciembre de 1989 del volcán Redoubt flotó por encima del este de Alaska, por el oeste de Canadá y finalmente se disipó por encima del oeste y sur-central de los Estados Unidos y norte de México (Heffter et al., 1990; Schnetzler et al., 1994-este volumen), viajando a través del espacio aéreo de tres países diferentes y en al menos cinco diferentes Regiones de Información de Vuelo.

Tres fuentes esenciales de información sobre la actividad volcánica y nubes de ceniza incluyen observaciones de tierra para alertar y verificar de una erupción; de los pilotos a través de sus informes sobre la actividad eruptiva y las nubes de ceniza; y de las observaciones de satélite para descubrir y rastrear nubes de ceniza. Ninguna fuente individual de información es completamente confiable, por lo que la retroalimentación entre las tres es esencial para una comunicación más completa y exacta. Para la aviación de tierra o la que está en ruta hacia una nube de ceniza potencialmente riesgosa, las comunicaciones entre los controladores de tráfico aéreo, los despachadores de vuelo y los pilotos, normalmente llevan a una estrategia de evasión exitosa de la nube, que significará llevar combustible adicional o la planeación de rutas alternas para evitar el espacio aéreo contaminado.

8.4.15 Reportes de Pilotos

El tráfico aéreo tiene una tradición de confiar en los reportes del piloto (PIREPS) para indicar la naturaleza de las condiciones encontradas por ellos mientras vuelan. Éstos, usualmente son confiables para los fenómenos de tiempo que normalmente están ocurriendo, pero han demostrado ser menos fiables para la actividad infrecuentemente observada como las erupciones volcánicas. Una forma de reporte utilizada cuando una erupción volcánica es descubierta o se sospecha de ella, fue

desarrollada (Fox, 1988) para asegurar que las tripulaciones aéreas hicieran reportes uniformes de los eventos volcánicos precisos y completos considerando la ubicación, tiempo y naturaleza del mismo. Frecuentemente, un piloto que sale de una área de Anchorage cubierta por una nube, podría pasar a través de las nubes en un cielo claro y luminoso, ver la quietud, la pluma de vapor libre de ceniza en el volcán Redoubt e informar al ARTCC de Anchorage que él estaba viendo una nube eruptiva con ceniza. Estos informes fueron ampliamente supervisados por otros pilotos y aerolíneas y frecuentemente dieron como resultado una ola de llamadas telefónicas a AVO-Anchorage para solicitar la verificación de los reportes de los pilotos. Típicamente, estos informes fueron de la pluma de vapor persistente.

8.4.16 NOTAMs y SIGMETs

NOTAMs (Aviso a los Aviadores) y SIGMETs (Información Meteorológica Significativa) son las dos formas comunes de reportes rápidos emitidos por el FAA y el Servicio Nacional del Clima a los pilotos. Son numerosas las reglas y tradiciones que gobiernan la preparación y emisión de estos informes (Servicios de Clima para la Aviación, 1985). Como los informes del piloto, estos reportes generalmente son confiables para proporcionar información respecto de los fenómenos climáticos que están ocurriendo. Sin embargo, tienen varias limitaciones cuando se aplican a eventos volcánicos que son a menudo efímeros y donde el tiempo es crítico. Primero, la emisión de SIGMETs normalmente requiere la aprobación en Washington DC, seguido por la autorización del Centro Nacional del Clima en la ciudad de Kansas. Normalmente esta aprobación y la emisión ocurre dentro de la primera media hora de preparación inicial del informe por el Centro del Vuelo local. Segundo, los informes frecuentemente omiten el tiempo del evento observado y el tiempo del informe del piloto sobre un evento. Como las erupciones volcánicas son a menudo eventos efímeros que duran de unos pocos minutos a varias horas, y como las nubes de ceniza normalmente se dispersan rápidamente desde su origen, es importante para los usuarios de estos informes conocer la historia de tiempo de tal información. En el volcán Redoubt, se emitieron NOTAMs que estuvieron activos por más de 36 horas después de una erupción ocurrida. Como los NOTAMs llevaban una declaración alarmante sobre los riesgos potenciales de la ceniza, las compañías que supieron de estos informes fueron perdiendo gradualmente la confianza de tales reportes (Haeseker, 1991).

Cada NOTAM y SIGMET deben claramente establecer el tiempo en que ocurrió el evento o en que se informó, como fue recomendado por la norma de procedimientos para reportes (Servicios del Clima de Aviación, 1985). Esta información permitiría a los pilotos y otros usuarios evaluar las condiciones y tomar decisiones independientes respecto de las condiciones de vuelo, lo cual es el intento de tales notificaciones (Servicios del Clima de Aviación, 1985).

8.4.17 Educación y Conocimiento

No hay ninguna manera completamente segura de volar a través de una nube de ceniza sin dañar un avión. La única manera de garantizar la seguridad del avión es

evitarla. Puesto que no pueden detectarse las nubes de ceniza utilizando la generación actual de radares aerotransportados, las comunicaciones inmediatas al piloto sobre una amenaza volcánica potencial son esenciales para evitar su encuentro con éxito. Evitar una nube de ceniza puede ser difícil o incluso imposible para un avión en vuelo, especialmente por la noche. Como semejante encuentro casi seguro producirá algún daño al avión, dependiendo del contenido de ceniza de la nube y de la duración del encuentro, existen procedimientos que las tripulaciones deben ejecutar para reducir y minimizar el daño de semejante encuentro (Campbell, 1991b). Estos pasos incluyen la reducción en la potencia de las turbinas y virar el avión en 180 grados para escapar la nube de ceniza. Tales acciones requieren que los pilotos estén bien informados sobre la naturaleza de las nubes de ceniza y que estén bien entrenados de antemano sobre los procedimientos recomendados para minimizar el daño. Para aviones aún en tierra o en ruta hacia una nube de ceniza potencialmente riesgosa, la comunicación entre controladores, despachadores y pilotos, normalmente pueden llevar a una estrategia para evitar el encuentro con éxito.

8.4.18 Nubes de ceniza con trayectorias lejanas

Los encuentros en el oeste de Texas el 17 de diciembre de 1989 indicaron que las nubes de ceniza con trayectorias lejanas también pueden amenazar la seguridad de un avión. Por tanto, las pautas siguientes deben seguirse si el piloto, despachador o controlador de vuelo creen que la ceniza volcánica podría ser encontrada.

- Si una nube de ceniza es visible a un piloto, debe evitarse la entrada en dicha nube.
- Como la visibilidad requiere luz del día, una extensión de esta regla debe ser que si los informes del piloto, los NOTAMs y SIGMETS, y el análisis de imágenes de satélite y/o predicción de trayectorias de nubes de ceniza indican que ésta podría estar presente en un espacio aéreo, éste último debe ser evitado hasta que pueda ser determinado y estar seguro de poder entrar.

8.5 Conclusiones

8.5.1 En aeropuertos:

- Para espesores pequeños de ceniza, el problema principal es la alteración de los itinerarios normales de vuelos. No hay daños permanentes si las aeronaves se mantienen inmóviles y los equipos apagados.

En aerovías:

- No hay ninguna manera completamente segura de volar a través de una nube de ceniza sin dañar el avión. La única manera de garantizar la seguridad del avión es evitar la nube de ceniza.

- Es indispensable conocer los siguientes datos:
 - Verificar que la nube lleva ceniza.
 - Determinar la altitud de los techos de nubes de ceniza.
 - Predecir la trayectoria de las nubes de ceniza y sus proporciones.
- Es importante contar con un sistema rápido de información verdadera y oportuna entre; el centro de monitoreo volcánico, los sistemas de rastreo de las nubes de ceniza y los pilotos de aviones.
- Bastaron menos de 5 minutos dentro de una nube de ceniza fina, que se encontraba a 280 Km del volcán, para que un Boeing 747-200 sufriera daños que requirieron del reemplazo de los 4 motores y muchas componentes y equipos.

8.6 Recomendaciones

En cualquiera de los aeropuertos designados, Texcoco o Tizayuca:

- Establecer un enlace de alta velocidad para datos, voz y video, entre el centro de monitoreo volcánico (CENAPRED) y las autoridades aeroportuarias para la oportuna y adecuada información en caso de que el Popocatepetl o alguno de los volcanes monitoreados por el CENAPRED, presente nubes de ceniza.

Aclaración:

La siguiente información ha sido traducida de algunos artículos, reportes o boletines sobre incidentes de encuentros de ceniza volcánica en otros lugares del mundo. Los artículos se mencionan en la bibliografía.

8.7 Bibliografía

Bernard, A., and W.I. Rose, Jr., 1990. The injection of sulfuric acid aerosols in the stratosphere by El Chichón Volcano and its related hazards to the international air traffic: Natural Hazards, v. 3, pp. 59-67

Blong, R. J., 1984. Volcanic Hazards, a source book on the effect of eruptions: Academic Press, p. 424.

Brantley, S.R. (ed), 1990. The eruption of Redoubt Volcano, Alaska, December 14, 1989-August 31, 1990: U. S. Geological Survey Circular 1061. p. 33.

Casadevall, T. J. (ed), 1991. The first International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, Programs and Abstracts: U. S. Geological Survey Circular 1065, p. 58.

Casadevall, T. J., 1994. The 1989-1990 Eruptions of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. v. 62 (1-4), pp. 301-316.

Fox, T., 1983. Global airways volcano watch is steadily expanding: *ICAO Bulletin*, April pp. 21-23.

McClelland, L., T. Simkin, M. Summers, E. Nielsen, and T. C. Stein, 1989. *Global Volcanism 1975-1985*: Prentice-Hall Inc., p. 655.

PVOT (Pinatubo Volcano Observatory Team), 1991. Lessons from a major eruption: Mt. Pinatubo, Philippines: *Eos*, v. 72, pp. 545, 552-553, 555.

Rogers, J.T., 1984. Results of El Chichón: Premature acrylic window crazing: *Boeing Airliner* (April-June), pp. 19-25.

Rogers, J.T., 1985. Results of El Chichón-part II: Premature acrylic window crazing status report: *Boeing Airliner* (April-June), pp. 1-5.

Rose, W. I., 1987. Interaction of aircraft and explosive eruption clouds: A volcanologist perspective: *Aerospace Industries Association of America Journal*, v. 25, pp. 52-58.

Smith, W. S., 1983. High-altitude conk out: *Natural History*, v. 92, no. 11, pp. 26-34.

Steenblik, J. W., 1990, Volcanic ash: a rain of terra: *Air Line Pilot*, June/July 1990. pp. 9-15, 56.

Tanaka, M., and N. Hamada, 1991. The eruption cloud of Mt. Pinatubo observed by Geostationary Meteorological Satellite: (abs) *Programme and Abstracts*, *Volcanological Society of Japan*, no. 2, p. 159.

Tootell, B., 1985. All 4 engines have failed: the true and triumphant story of flight BA 009 and the Jakarta incident, *Hutchinson Group Ltd.*, Auckland, p. 178.

Wright, T. L. and T. C. Pierson, 1992. *Living With Volcanoes- The U. S. Geological Survey's Volcano Hazard Program*: U. S. Geological Survey Circular 1073, p. 57.

9. DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE NUBES DE CENIZA

Enrique Guevara Ortíz, Roberto Quaas Weppen, Carlos Valdés González y Servando de la Cruz Reyna

El sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl, en particular el del monitoreo sísmico, permite en primera instancia, detectar señales relacionadas con emisión de cenizas causadas por exhalaciones o por explosiones. Cuando las condiciones atmosféricas permiten tener visibilidad hacia el volcán con las cámaras de video, se confirma la salida de material e inmediatamente se procede a informar al SENEAM las características iniciales de la emisión: hora de inicio, altura estimada y dirección inicial, además de dar un seguimiento del evento.

Por su parte el SENEAM da aviso al CENAPRED de los informes de las aeronaves que sobrevuelan la zona, confirmando la altitud y dirección de la nube de ceniza.

Los datos que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional sobre la dirección y velocidad del viento, son útiles para en un momento dado prever la caída de ceniza en ciudades y aeropuertos.

9.1 Empleo de Satélites para Detección de Cenizas Volcánicas

Con el lanzamiento de nuevos satélites y los nuevos desarrollos en las técnicas de percepción remota, actualmente se han ampliado las posibilidades de monitorear a los volcanes usando los satélites. Otra técnica es el uso de radares hidrometeorológicos también para detectar y dar seguimiento a emisiones de ceniza. Estas nuevas técnicas complementan en forma importante a los sistemas de monitoreo.

En el caso de los satélites, los sensores detectan la energía electromagnética que es absorbida, reflejada, radiada o dispersada por la superficie del volcán o por el material expulsado en una erupción.

Existe una variedad de sensores que miden diferentes longitudes de onda o bandas, inclusive más allá del espectro visual, como son ondas ultra-violetas e infrarrojas. Las cenizas volcánicas son detectadas por sensores visibles e infrarrojos lo que permite tener información no sólo en el día, sino también durante la noche. Además, la banda de infrarrojo nos proporciona datos de la temperatura de la pluma de ceniza, que relacionada con información de las radiosondas de los satélites, puede ser usada para estimar la altitud de la pluma. Los datos en el infrarrojo sirven también para determinar anomalías térmicas en el sitio de la erupción, con ciertas restricciones y limitaciones. Para diferenciar las emisiones de

ceniza de fenómenos meteorológicos se emplean diferentes técnicas que mezclan dos bandas o una diferencia de ellas. Los datos del espectro ultravioleta también pueden ser usados para determinar la presencia de aerosoles que incluyen ceniza volcánica y bióxido de azufre.

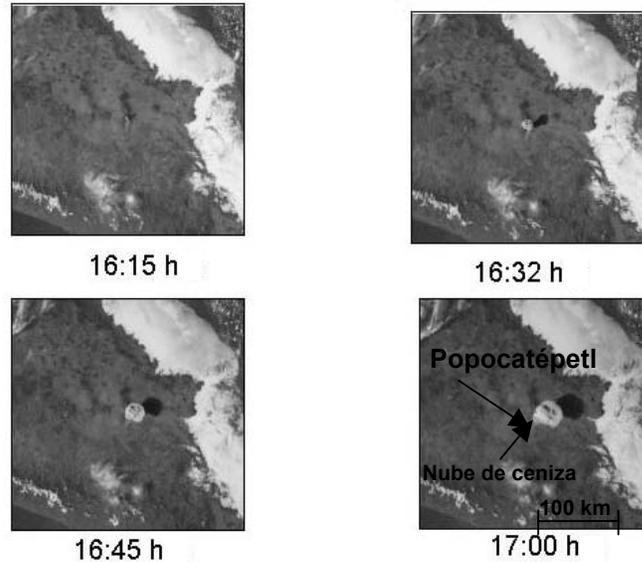
Para dar seguimiento a las emisiones del volcán Popocatépetl, se tienen disponibles a través de Internet, una serie de imágenes ya procesadas de diferentes satélites, que ha permitido, en la mayoría de los casos, dar seguimiento de las emisiones de ceniza.

Entre éstas, se encuentran disponibles las imágenes de los satélites geoestacionarios NOAA GOES 8 y GOES 10 procesadas en la Universidad de Hawaii por investigadores del Instituto de Geofísica y Planetología, las cuales son actualizadas cada 15 minutos. Esto permite una observación casi en tiempo real de puntos calientes y el movimiento de las nubes cuando las condiciones atmosféricas así lo permiten. (<http://hotspot.pgd.hawaii.edu/goes/popocatepetl/latest.shtml>)

En las siguientes figuras se muestran algunas de las imágenes de satélite obtenidas cuando el volcán ha presentado alguna actividad.



Exhalación del 12 de diciembre de 2000 a las 16:01. Imagen del satélite GOES (infrarroja) con la nube de ceniza



Dispersión de la nube de ceniza producida por el volcán Popocatépetl el día 22 de enero de 2001. Imágenes del satélite GOES, U. de Hawai

En forma complementaria a los satélites geostacionarios existen dos satélites conocidos como de Observación Infrarroja con Televisión Avanzada, que continuamente circulan la tierra, obteniendo datos en promedio cada 6 h. Estos satélites llevan a bordo un radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR), que de igual forma a los geostacionarios permiten detectar las nubes volcánicas y distinguirlas de la meteorológicas utilizando la técnica de substracción de bandas de las imágenes de infrarrojo térmico.

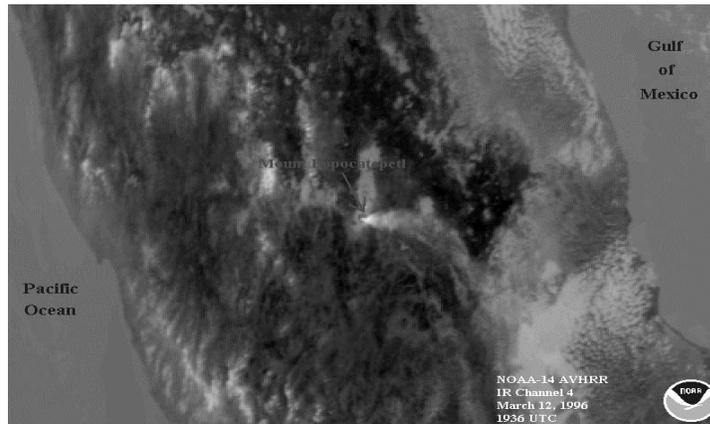


Imagen AVHRR infrarroja de la actividad del Volcán Popocatépetl del de 12 de marzo de 1996

La información recolectada de las imágenes de satélite son utilizadas para dar aviso y alertar a las aeronaves. Esto se realiza a través de nueve Centros Asesores de Ceniza Volcánica (VAAC's) alrededor del mundo: Anchorage, Buenos Aires, Darwin, Londres, Montreal, Tokio, Toulouse, Washington DC y Wellington. Estos centros tienen la tarea de monitorear las plumas de ceniza volcánica dentro del espacio aéreo asignado a cada uno y emitir los comunicados correspondientes (VAAS) cuando ocurre algún evento.

Para el caso de México y del volcán Popocatépetl le corresponde al Centro de Washington, DC, en los Estados Unidos. La información relacionada con las emisiones del volcán Popocatépetl se encuentran disponibles a través de su página en Internet. Tienen a disposición las últimas imágenes de los satélites GOES en las bandas visible e infrarroja así como los últimos avisos de alertamiento (<http://hpssd1en.wwb.noaa.gov/VAAC/popo.html>)

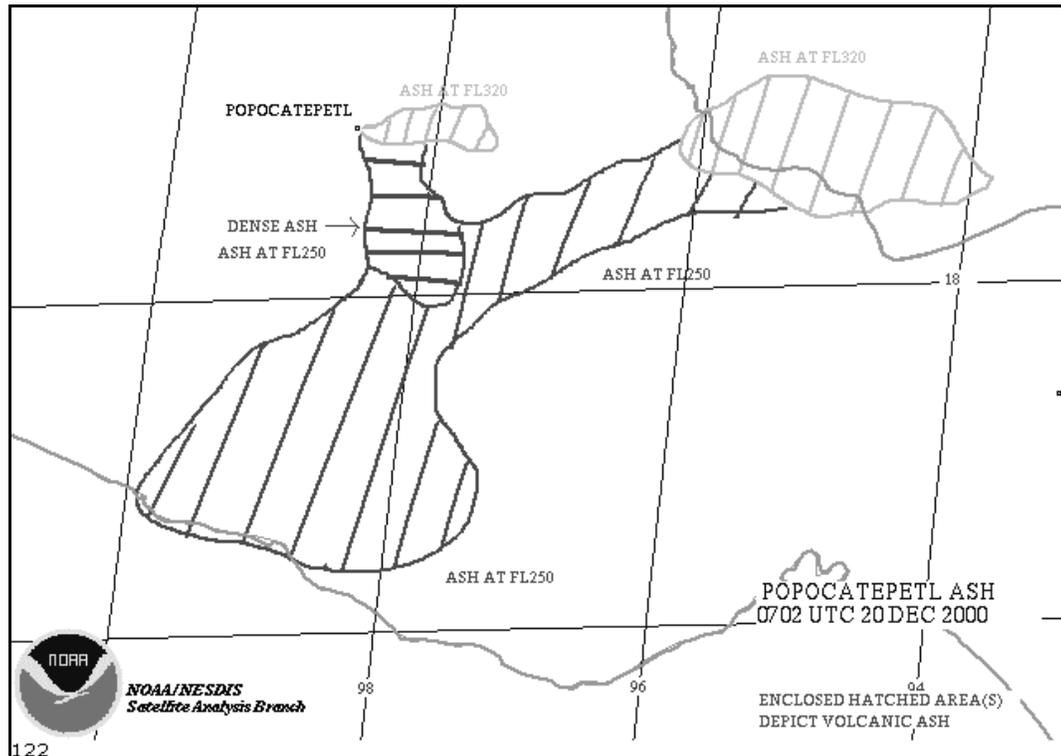


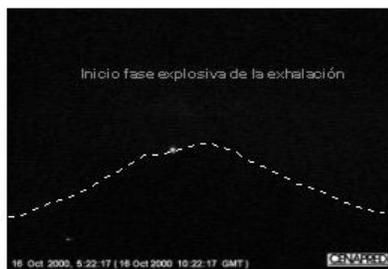
Figura de la presencia de la nube de cenizas del 20 de diciembre de 2000 reportada por el VAAC de Washington

9.2 Ejemplo de Radares Hidrometeorológicos para Detección de Cenizas

El radar es una manera muy especial de usar señales de radio y su principio consiste en la transmisión de un pulso de una señal de radio, transformación del pulso en un haz enfocado con gran precisión y la recepción de los reflejos que regresan de los blancos con los que el haz tuvo contacto. Para el radar meteorológico, el blanco usado es la precipitación – gotas de lluvia, granizo, copos de nieve, entre otros-, aunque también sirven para la localización de ceniza volcánica, así como para su seguimiento.

El CENAPRED contó hasta noviembre de 2000 con un radar Doppler ubicado en sus instalaciones que permitía detectar emisiones de ceniza o material expulsado por el volcán aún cuando no se tuviera confirmación visual. Dicho radar fue donado por el Servicio Geológico Norteamericano (USGS) y se instaló en 1997. La mayoría de las veces fue posible detectar estas emisiones, convirtiéndose así en una importante herramienta para el alertamiento a las autoridades de aeronavegación. A continuación se muestran imágenes del radar durante la exhalación del 16 de octubre del 2000.

Exhalación del 16 de octubre de 2000 a las 05:20 hrs **CENAPRED**



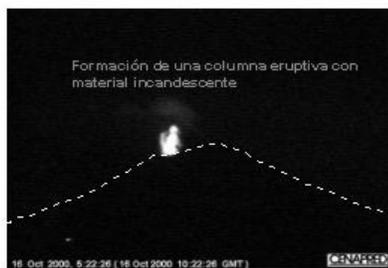
Video

05:22:17



Radar

05:22:16



Video

05:22:35



Radar

05:22:36

Exhalación del 16 de octubre de 2000 y cómo fue detectada por el radar meteorológico del CENAPRED

Explosión del 17 de diciembre de 1998 a las 18:47 

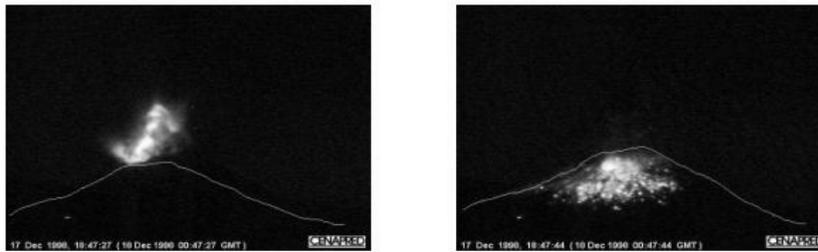


Imagen de video



Imagen de radar

Explosión del 17 de diciembre de 1998 y la imagen de radar correspondiente

9.3 Detección y Alertamiento de Cenizas en Aeropuertos

El aeropuerto internacional de Kagoshima, en Japón, se encuentra muy cerca del volcán Sakurajima. La actividad del volcán es cuidadosamente monitoreada y el aeropuerto es informado continuamente sobre la situación volcánica. Los Drs. Jennie Gilbert y Steve Lane, han trabajado en el desarrollo de sistemas con técnicas electrostáticas, para medir y detectar nubes de ceniza volcánica. Ellos se basan en el principio de que, como las tormentas, las nubes volcánicas se encuentran fuertemente cargadas eléctricamente y que la perturbación del campo eléctrico de la atmósfera que generan, puede ser detectada. Estas perturbaciones del campo eléctrico atmosférico, pueden ser detectadas al medir el gradiente del potencial eléctrico, usando un medidor electrostático (JCI 121, medidor de campo electrostático). En el Sakurajima, se han instalado 12 de estos instrumentos.

9.4 Conclusiones

Los sistema de monitoreo y vigilancia de volcanes, son una herramienta indispensable, que además de permitir conocer la actividad de un volcán, permiten detectar en forma oportuna emisiones importantes de ceniza. Para el caso del monitoreo del volcán Popocatépetl se cuenta ya con un moderno sistema, aunque

sería recomendable la instalación de más cámaras de video que permitieran hacer un seguimiento visual.

Como complemento a los sistemas de monitoreo, existen nuevas técnicas de percepción remota para dar seguimiento a las nubes de ceniza y alertar a las autoridades de aeronavegación y aeropuertos. Si bien estas técnicas son útiles, también presentan algunas desventajas, con el hecho de que en ocasiones es difícil distinguir las nubes atmosféricas de las nubes de cenizas volcánicas y además no se detectan bajas concentraciones.

Por otro lado el uso de los radares hidrometeorológicos, representan una nueva opción con una mejor resolución y un rastreo continuo de nubes de ceniza en casi cualquier condición de tiempo, sin embargo la inversión y los gastos de mantenimiento son muy altos. Desafortunadamente el CENAPRED ya no cuenta con esta herramienta debido a un desperfecto en la unidad. Es por tanto, necesario buscar los recursos o el financiamiento de un nuevo radar que permita su empleo para la detección, seguimiento y alertamiento de nubes de ceniza.

Finalmente se sugiere el instrumentar algunas medidas para detectar la presencia de ceniza en aeropuertos. Esto proveería de un elemento objetivo para la toma de decisiones.

10. EFECTOS DE LAS CENIZAS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL EN LA AERONAVEGACIÓN

Hugo Delgado

Las erupciones volcánicas explosivas suelen inyectar ceniza y gases corrosivos en cantidades variables a la troposfera superior y a la estratosfera baja, que son desafortunadamente, las altitudes de operación del tráfico aéreo. En las últimas décadas, más de 60 aeronaves se han visto dañadas por nubes errantes de cenizas que han contaminado rutas aéreas e instalaciones aeroportuarias (Casadevall, 1991). Las plumas pasivas (compuestas fundamentalmente de gas y cantidades menores de ceniza muy fina) no representan una amenaza significativa para la aviación, mientras que las columnas y nubes eruptivas deben ser evitadas.

Las nubes de cenizas poseen la mayor amenaza a la aviación. La mitigación de este tipo de amenazas es muy difícil debido a que estas nubes no pueden ser detectadas por radares convencionales ni visualmente desde un avión, menos aún durante la noche ya que pueden ser oscurecidas por nubes climáticas. Los encuentros de aeronaves con nubes errantes de cenizas han producido incidentes muy serios en los que las turbinas de aviones Boeing 747 principalmente, se han apagado totalmente debido a la fusión de cenizas dentro de las mismas, provocando el desplome de las aeronaves. Hasta el momento, en ningún incidente se han tenido pérdidas humanas, ya que en todos los casos se ha logrado recuperar el funcionamiento de las turbinas nuevamente (para mayores detalles ver capítulo 8).

El costo de reparaciones a las aeronaves ha llegado a alcanzar los 80 millones de dólares americanos (Casadevall, 1991) en incidentes que se han presentado durante las erupciones del Galunggung (Indonesia) en 1982 (Smith, 1983; Gourgaud et al., 1989), Redoubt (E.U.A.) en 1989-1990 (Casadevall, 1994) y Pinatubo (Filipinas) en 1991 (Casadevall et al., 1993).

Durante las erupciones del Monte Santa Helena (E.U.A.) en 1980, en el Monte Spurr (E.U.A.) en 1992, y en el volcán Láscar (Chile) por ejemplo, las operaciones aeroportuarias se vieron interrumpidas y numerosos vuelos se cancelaron, pero no sólo las operaciones aeroportuarias locales se vieron alteradas, sino además, otras regiones de los Estados Unidos, y aún, las de otros países se vieron afectadas (Casadevall, 1993).

Muchos aeropuertos del mundo de ciudades medianas y grandes operan cerca de volcanes activos. El aeropuerto de Kagoshima (Japón) se encuentra ubicado a poca distancia del volcán Sakurajima (el volcán más activo del Japón), de manera que durante las erupciones de este volcán, las operaciones aéreas son alteradas, pero

las medidas de seguridad han impedido que ningún incidente se haya verificado aún durante días de gran actividad del volcán.

Aeropuertos mexicanos como el de la ciudad de Puebla, guardan ciertas similitudes con el aeropuerto de Kagoshima, dada su cercanía a volcanes muy activos. Recientemente, con la erupción del volcán Popocatepetl, las operaciones aeroportuarias han tenido que revisar sus estrategias de prevención de accidentes, así como protocolos y actividades relacionadas con emergencias volcánicas.

Los encuentros mencionados de aeronaves con nubes de cenizas habían ocurrido en países tales como los Estados Unidos de América, Japón, Indonesia, Filipinas, etc. y en México comenzaron a ocurrir durante la presente erupción del volcán Popocatepetl, en especial a partir de 1996. Debido a las implicaciones que los encuentros con nubes de cenizas tienen en la seguridad aérea, se hace necesario revisar y analizar algunos incidentes para los cuales existe documentación.

Este trabajo pretende revisar de manera general los efectos de las nubes de cenizas en la aeronavegación y hacer un análisis de algunos de los eventos ocurridos en nuestro país durante la erupción del Popocatepetl.

Esta revisión se hace necesaria por el aumento en las incursiones de aviones en nubes de cenizas a escala global e incluso porque ha sido considerable el número de aeronaves afectadas por la erupción del Popocatepetl (aunque éstas pueden considerarse afectaciones menores en términos de seguridad aunque de alto costo económico). Esto se debe al creciente número de operaciones aéreas. Las afectaciones que las cenizas volcánicas tienen en las actividades aeronáuticas causan temor en las aerolíneas por las implicaciones que tendría un accidente fatal y por el alto costo que implica el desgaste de sus equipos.

No obstante, se hace necesario también guardar las proporciones debidas de los efectos de las cenizas volcánicas en la aeronavegación y no caer en exageraciones que pudiesen implicar gastos aún más cuantiosos de los reales. El análisis de los fenómenos y la reflexión de los eventos ocurridos pueden ayudar a dimensionar los problemas y sus soluciones.

10.1 Efectos de las Cenizas Volcánicas en la Aeronavegación

Las nubes de cenizas transportadas por el viento pueden viajar por grandes distancias. Sus efectos en la aeronavegación pueden ser en las aeronaves en vuelo o en las instalaciones aeroportuarias.

Las aeronaves en vuelo que cruzan nubes de cenizas están expuestas, en varias de sus partes, a la abrasión y fusión de las cenizas volcánicas. Particularmente vulnerables son los motores y turbinas, parabrisas, tomas de estática y pitot. Asimismo, los sistemas de comunicación, sensores de temperatura, sistemas de ventilación de combustible y de aire acondicionado.

Las nubes de cenizas afectan seriamente la aeronavegabilidad al ser cruzadas por horas, al extenderse por miles de kilómetros se vuelven indetectables para la instrumentación y a simple vista semejan una nube meteorológica. Cuando las cenizas permanecen por muchas horas dentro de una turbina pueden ser fundidas y taponar los ductos de combustible y aire disminuyendo el funcionamiento de las mismas e incluso detenerlas (Figura 1). Sin embargo, aún cuando las turbinas no lleguen a detenerse, éstas pueden llegar a ser dañadas de manera severa por abrasión, haciéndose necesario su reemplazo. Debido a la estática que producen las cenizas, las comunicaciones se ven afectadas y su presencia en los sensores de temperatura impide el buen funcionamiento instrumental y la toma de decisiones durante el vuelo.

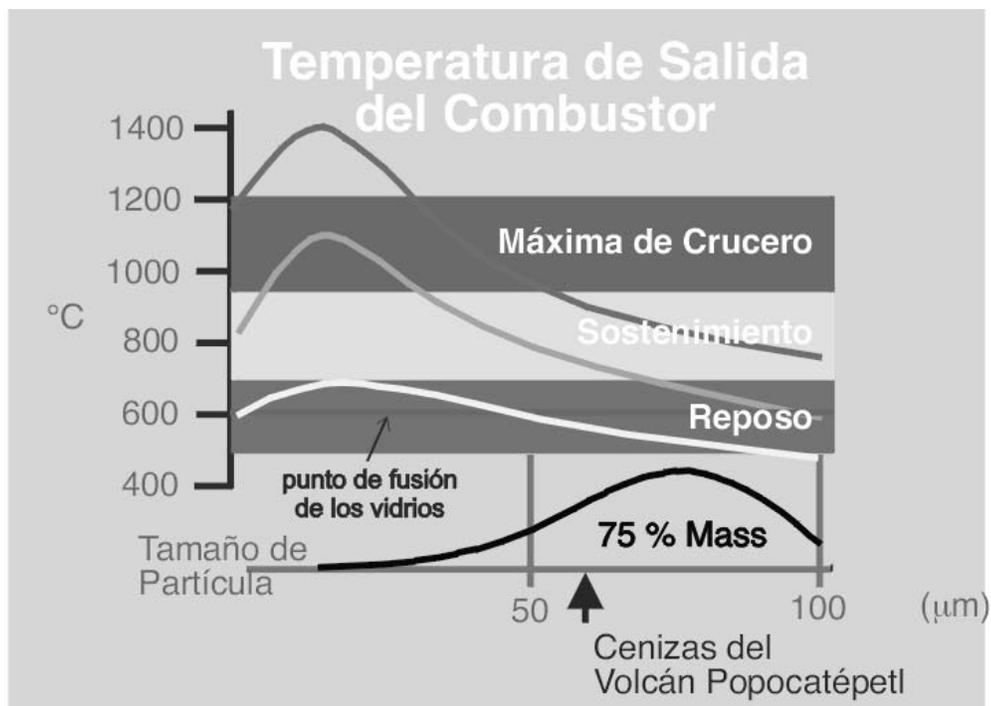


Figura 1. La mayor parte de las cenizas volcánicas se funden a más de 600°C, aunque la temperatura de fusión de los diferentes componentes de las cenizas (fragmentos diminutos de minerales, roca y vidrio) varía de acuerdo a su composición, así como del tamaño de la partícula. En esta figura se muestra que las cenizas finas ($\leq 50 \mu\text{m}$), que representan comúnmente menos del 25 % de la masa, son las más propensas a fundirse a las temperaturas de operación de una turbina. Las turbinas en operación de crucero trabajan normalmente a 1000°C o más, temperatura que está por encima de la temperatura de fusión de los componentes de las cenizas volcánicas. (Modificada de Boeing, 1992).

Las cenizas transportadas por el viento caen eventualmente a la superficie terrestre, cubriendo áreas de infraestructura importantes como los aeropuertos. Siendo las instalaciones aeroportuarias extensiones considerables relativamente, debido a las áreas de rodaje y despegue, los efectos de las cenizas precipitadas durante un evento de lluvia de piroclastos, puede ocasionar daños a las aeronaves y a las instalaciones aeroportuarias, tales como las instalaciones de instrumentos de apoyo a la navegación (radares) o a zonas no protegidas como las áreas de electrónica y cómputo.

Estos efectos pueden ser función de la contaminación de las pistas, calles de rodaje, plataformas, franjas de seguridad, señalamientos, etc. La presencia de cenizas hace que el coeficiente de fricción de las pistas cambie, puede contaminar las tomas de los hidrantes de los combustibles y afectar los bancos de luces, entre otros. Además, se puede llegar a tener afectación de instalaciones estratégicas tales como plantas de emergencia y subestaciones eléctricas, plantas de almacenamiento de combustibles y sus hidrantes, el sistema de radioayuda y en general, los sistemas de comunicaciones y electrónicos.

El cubrimiento y/o sepultamiento de estructuras y edificios puede provocar el colapso de techos de casas y edificios, y destruir líneas de transmisión eléctrica y comunicaciones. La carga que representa una capa de tefra de 10 cm de espesor puede variar entre 40-70 kg/m² (tefras secas) y 100-125 kg/m² (tefras húmedas)(Tilling, 1993). Por esta razón, techos de lámina, techos planos o techos no contruidos para soportar este tipo de cargas, son propensos a colapsarse durante erupciones volcánicas mayores.

Estas afectaciones se dan en el caso de erupciones volcánicas de gran magnitud que producen grandes columnas de cenizas que son transportadas eficientemente por los vientos dominantes para formar una gran nube de cenizas. Aún cuando no todas las erupciones volcánicas son de gran magnitud, es importante observar las mismas precauciones en las erupciones de menor magnitud, en especial cuando las instalaciones aeroportuarias están demasiado cerca de los volcanes (menos de 100 kilómetros), ya que estos casos son más frecuentes que el de las grandes erupciones y, aunque la densidad de estas nubes de ceniza es menor, los efectos pueden presentarse con un impacto importante en el largo plazo por los altos costos de mantenimiento que provocan.

Si bien pocas cenizas volcánicas ingeridas por las turbinas de las aeronaves en vuelo no representan un peligro para la vida humana, pueden tener efectos importantes de carácter económico al acelerar el desgaste de las partes internas de las turbinas. Una mayor cantidad de cenizas, o bien, una permanencia prolongada dentro de una nube de cenizas, pueden ocasionar que las turbinas se detengan y provocar el desplome de una aeronave, constituyendo de esta manera una amenaza para la vida de sus ocupantes, así como de la población en el terreno.

Los efectos de las cenizas en la aeronavegación son una de las motivaciones importantes para reconocer las zonas volcánicas, pues los efectos de las cenizas tienen un impacto económico muy importante y su estudio permite prever las áreas donde con mayor frecuencia se moverían las nubes de cenizas.

10.2 Nubes de Cenizas del Popocatepetl e Implicación para La Aeronavegación

Cuando las nubes de cenizas se encuentran cerca de su fuente, es decir, cerca de los volcanes que les dan origen, es fácil distinguirlas (Fotografía 1). Sin embargo, al alejarse de su fuente, y particularmente, a varias decenas, cientos o miles de kilómetros, una nube de cenizas puede parecerse a una nube meteorológica debido a que los tamaños de las cenizas finas pueden ser de sólo algunos micrómetros. Son estas nubes de cenizas las que constituyen una amenaza importante para las aeronaves en vuelo pues no son detectables por los instrumentos convencionales de navegación (Fotografía 2).



Fotografía 1. Nube de cenizas del volcán Popocatepetl producida el 29 de diciembre de 1994. En este tipo de nubes de ceniza es fácil distinguir su fuente de origen.

Las columnas eruptivas del Popocatepetl han alcanzado altitudes máximas de más de 30 kilómetros, aunque las altitudes máximas fluctúan entre 6 y 15 kilómetros de altitud. Las nubes de cenizas resultantes se caracterizan por ser de moderada a pobremente densas. Es decir, poseen concentraciones bajas a moderadas de material piroclástico. Aún cuando no se tienen estimaciones de densidad, ésta se infiere por los casi imperceptibles (y de hecho difíciles de medir) espesores de cenizas en la vecindad del volcán (en poblaciones de entre 16 y 50 kilómetros de distancia al cráter del volcán).



Fotografía 2. Nube de cenizas del volcán Popocatépetl producida el 21 de marzo de 1997. Este tipo de nubes de ceniza se confunde con las nubes meteorológicas a más de 100 km del volcán.

El mayor componente de las nubes de cenizas, además del material fragmentado, son los gases volcánicos. El volcán Popocatépetl ha emitido cantidades muy importantes de gases a lo largo del periodo que se ha encontrado en erupción y ha sido posible medir tasas de emisión récord en el ámbito internacional. No obstante, los gases volcánicos tienen un efecto menor en la aeronavegación, prácticamente insignificante conforme la distancia aumenta a más de 10 kilómetros de distancia al cráter.

En general, el alcance horizontal de la lluvia de cenizas por nubes errantes, ha sido muy restringido. La mayoría de las precipitaciones de ceniza se llevan a cabo en los primeros 30 km alrededor del cráter. Adicionalmente, las lluvias de ceniza se han verificado en la ciudad de México (parte sur) y en la ciudad de Puebla, debido a los patrones de viento preferenciales en las direcciones noreste y este en noviembre a mayo y hacia el poniente y norponiente entre junio y octubre. Los aeropuertos Internacional de la Ciudad de México (a 60 km del cráter en línea recta) y de Puebla (a 50 km), han sufrido los efectos de caída de cenizas leves. Los aeropuertos de Cuernavaca y de Toluca han sufrido en menor grado o nada la lluvia de cenizas.

10.3 Las Cenizas del Popocatépetl

El tamaño promedio de las cenizas del volcán Popocatépetl a 50 km de distancia del cráter, es entre 50 y 100 μ m. El tamaño promedio de las cenizas a 4 km (y ocasionalmente a 20 km) del cráter es hasta de 400 μ m. Los tamaños y alcances varían con la magnitud del evento explosivo (para poder alcanzar niveles atmosféricos donde los vientos son más intensos) y con la intensidad del viento. Las cenizas están compuestas fundamentalmente de fragmentos de roca (líticos), vidrio, feldespatos, olivino y pómez (Figura 2).

10.4 Efectos de la Actividad Eruptiva del Popocatepetl en la Aeronavegación

Durante la presente erupción del volcán Popocatépetl, ha habido varios eventos que han ocasionado trastornos en la aeronavegación de tres maneras: afectaciones a aeronaves en vuelo, a instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por falsas alarmas.

Ha habido varios encuentros de aeronaves con nubes de cenizas en diversas ocasiones y sólo se referirán a continuación algunos de ellos.

Entre el 1o. y 15 de mayo de 1997 cuando menos 17 aeronaves en vuelo fueron afectadas directamente por nubes de cenizas del volcán Popocatépetl. Los aviones afectados provenían de Mérida, Villahermosa, Veracruz, Cancún y Guatemala, cruzando por la zona entre los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl a distancias menores de 20 millas náuticas, entre 5000 y 7000 metros de altitud en trayectoria descendente y preparándose para aterrizar.

Las razones por las que se dieron estos encuentros son: la falta de visibilidad (todos los encuentros se llevaron a cabo de noche y bajo condiciones de nubosidad y lluvia), el trazo de la aerovía procedente del oriente del país (de la zona del Golfo de México) que pasa cerca de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl y falta de coordinación (entonces) entre las autoridades de aeronavegación y el observatorio volcánico del CENAPRED.

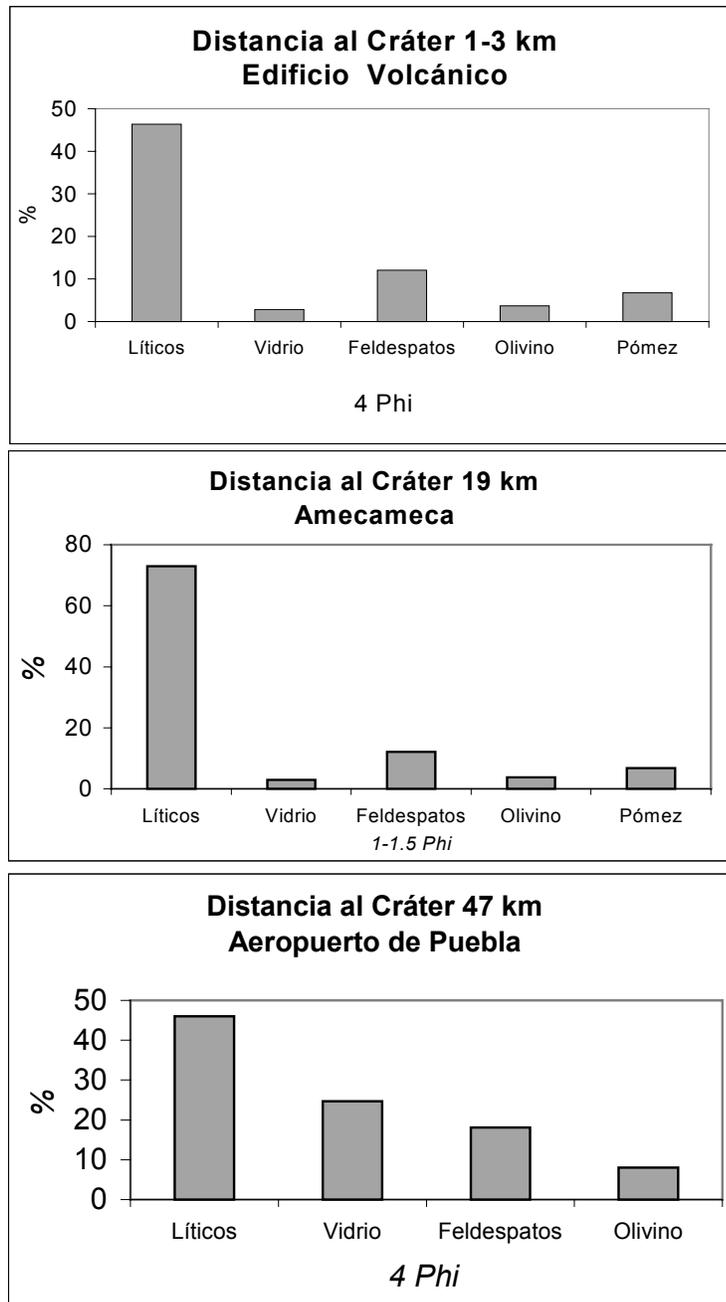


Figura 2. Composición modal de las cenizas. La figura de arriba muestra la composición de fragmentos que componen las cenizas del volcán Popocatepetl en sus cercanías para la fracción 4ϕ (.0625 mm de diámetro). La figura de en medio muestra lo mismo para la fracción 1.5ϕ (0.25 mm) a 20 km del volcán, mientras que la figura de abajo muestra las cenizas de tamaño 4ϕ a 50 km de distancia del cráter.

Las afectaciones más importantes fueron abrasión de partes diversas de las turbinas y destrucción parcial o total de los parabrisas por abrasión debida a las cenizas volcánicas. Todos los parabrisas (en pares), excepto en un sólo caso tuvieron que ser reemplazados debido a que los rasguños y fracturas producidos por el impacto de las cenizas, dificultaban o impedían ver a través de ellos (Figura 3; Fotografías 3 y 4).

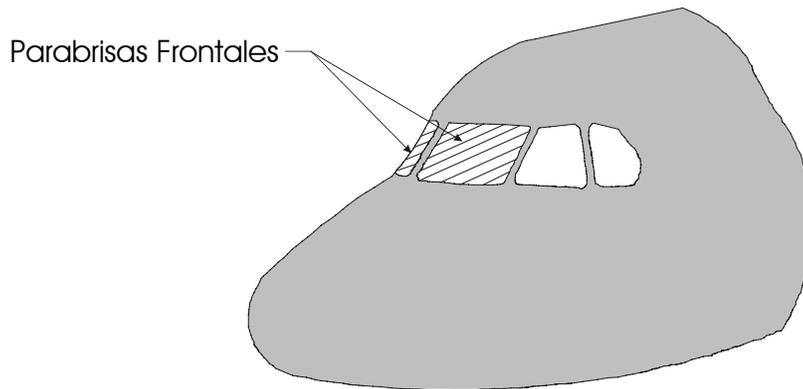
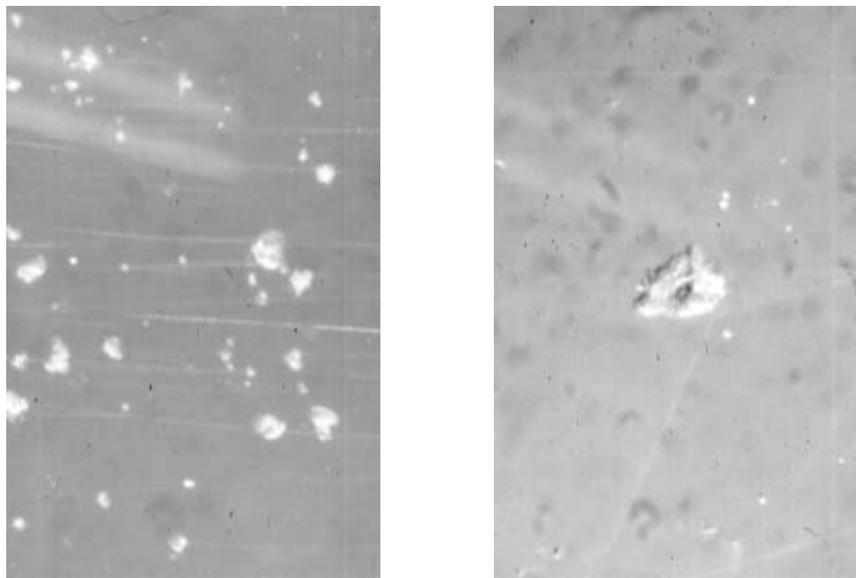


Figura 3. Posición de los parabrisas afectados de las aeronaves que cruzaron por una nube de cenizas el 11 de mayo de 1997, reduciendo la visibilidad fuertemente.



Fotografías 3 y 4. La fotografía 3 (izquierda) muestra un parabrisas afectado por la abrasión producida por cenizas volcánicas observado al microscópico. Las líneas que se observan son rasguños producidos por la abrasión de las cenizas, mientras que las manchas blancas son fracturas. La fotografía 4 (derecha) muestra un detalle de las fracturas conoideas producidas por el impacto de las cenizas sobre la superficie del parabrisas.

La erupción del volcán el 31 de julio de 1997 emitió cenizas en mayor abundancia, que fueron dispersadas hacia el noroeste del volcán hacia la ciudad de México. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México recibió por primera vez cenizas en sus instalaciones (pistas y edificios), obligando a cerrar por cerca de 8 horas sus instalaciones con las consecuentes afectaciones en el retraso de vuelos, desviación de aeronaves, saturación de los aeropuertos alternos, indemnización a viajeros, afectación de sus agendas, etc., además de las dificultades para limpiar las instalaciones del aeropuerto y pistas de rodaje que requirieron de un ejército de barrenderos para remover las cenizas.

Finalmente, ha habido ocasiones en que se han alterado las operaciones aeronáuticas debido a reportes de presencia de cenizas en la región provenientes del VAAC de Washington. En estas ocasiones, los reportes visuales de los pilotos o desde el observatorio del CENAPRED, no han confirmado la presencia de cenizas, por lo que se ha procedido a seguir las indicaciones del VAAC. Los reportes emitidos por el VAAC de Washington se basan primordialmente en imágenes obtenidas por los satélites. En esa perspectiva, es posible confundir una nube de baja concentración de cenizas, rica en gases volcánicos o en partículas de sílice coloidal, con una nube de cenizas que puede tener un efecto importante en la aeronavegación. En este tipo de casos, la prevención puede ocasionar también pérdidas económicas por el desvío de aeronaves e incluso el cierre del aeropuerto. Para evitar esto, es necesario mejorar los sistemas de observación y monitoreo de las nubes de cenizas volcánicas.

10.6 Reflexiones sobre los Encuentros

La amenaza a las instalaciones aeroportuarias cercanas al volcán Popocatepetl poseen la particularidad de que cuentan con muy poco tiempo de respuesta una vez que se confirma un evento explosivo. Si una nube de cenizas es dispersada por vientos de 30 nudos, la distancia a la Ciudad de México será cubierta en cerca de una hora, mientras que a Puebla llegará en cerca de 40 minutos.

Es importante mencionar que las incursiones en nubes de cenizas volcánicas por parte de las aeronaves mencionadas no tuvieron paro de turbinas debido a los tamaños de las cenizas volcánicas a la distancia en que cruzaron la pluma, por las temperaturas de las turbinas durante el proceso de acercamiento al aeropuerto (menores a 1000°C), que no son eficientes para provocar la fusión de las cenizas (ver Figura 1). Además, el tiempo de exposición a los efectos de las cenizas (alrededor de 2 minutos) no fue suficiente para que los efectos fueran de mayor consideración. Las aeronaves que se desplomaron en el Pacífico, mencionadas en la introducción, permanecieron en exposición continua a las cenizas por mucho más de media hora.

Finalmente, una consideración fundamental acerca de la aeronavegación en la región de la Cuenca de México, aún en tiempos en los tiempos previos a la erupción del volcán Popocatepetl, es que los suelos de la región son derivados de rocas volcánicas y contienen viejas cenizas volcánicas. Durante las temporadas de

tolvaneras, el polvo (cenizas, entre otras partículas) flota en el ambiente, de la misma manera que dentro de una nube de cenizas. Esta es una de las razones por las que el desgaste de los equipos es mayor en la Ciudad de México.

10.7 Conclusiones

Las operaciones aeronáuticas se han incrementado a escala global, por ello, ha aumentado la vulnerabilidad de las operaciones aeronáuticas ante la presencia de nubes de cenizas producidas por diversos volcanes. Los efectos de las cenizas en las aeronaves en vuelo pueden ocasionar el desplome de los equipos (en los casos más severos), o bien, un daño a las diferentes partes de los aviones. Las instalaciones aeroportuarias pueden ser afectadas fuertemente en pistas, instalaciones estratégicas, sistemas de comunicación, electrónicos y cómputo.

Las columnas eruptivas del Popocatepetl han alcanzado más de 20 km en forma extraordinaria y las nubes de cenizas que originan al ser transportadas por el viento se han caracterizado por una baja concentración de partículas y una alta concentración de gases. La lluvia de cenizas se concentra principalmente en los primeros 30 km alrededor del volcán y ocasionalmente llegan a más de 50 km, precipitándose en instalaciones aeroportuarias. En promedio, las cenizas volcánicas tienen tamaños entre 50 y 100 μm a 50 km del volcán y de 400 μm a distancias entre 4 y 20 km (dependiendo de la explosividad del evento). Las cenizas se componen principalmente de fragmentos de roca, vidrio, feldespatos, olivino y pómez.

Las operaciones aeronáuticas en México se han visto afectadas por las nubes de ceniza del volcán Popocatepetl de tres maneras: afectaciones a las aeronaves en vuelo, a instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por falsas alarmas. Los encuentros de las aeronaves con nubes de cenizas han ocasionado daños a partes diversas, en particular a los parabrisas, pero no han producido fusión de cenizas. Las falsas alarmas se deben a limitaciones en las metodologías para la detección de nubes de cenizas.

Si bien las operaciones aeronáuticas en el valle de México se caracteriza por la presencia de materiales volcánicos permanentemente, durante los eventos explosivos del Popocatepetl se ha observado que las nubes de cenizas implican una amenaza importante debido a la cercanía de las instalaciones aeroportuarias a la fuente eruptiva. La vulnerabilidad del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México es función de esta distancia pues incluso eventos explosivos de baja magnitud (que son más frecuentes y probables que los eventos de gran magnitud) lo pueden afectar pues las cenizas llegarían en una hora o dos, con vientos entre 30 y 15 nudos.

10.8 Perspectivas Futuras

Las instalaciones aeroportuarias deben estar a distancias mayores a 50 km del volcán y preferentemente en una dirección norte o sur, que son las direcciones con menor incidencia de vientos altos (aunque de mayor incidencia de vientos bajos).

Para evaluar mejor los efectos de la actividad eruptiva, es necesario estudiar mejor los casos de encuentros de aeronaves en el espacio aéreo mexicano con las nubes de cenizas. Para ello, es necesario una mayor colaboración de las compañías aéreas.

Asimismo, es importante llevar a cabo estudios que permitan limitar mejor las temperaturas de fusión de las cenizas del Popocatepetl en las condiciones cercanas a las operaciones aéreas y de esta manera reconocer los posibles efectos en las aeronaves.

Finalmente, se considera fundamental invertir en estudios que permitan mejorar e implementar la detección temprana de nubes de cenizas volcánicas, dados los tiempos tan limitados de reacción y activación de planes de emergencia. Esto es porque los satélites actuales reportan información cada 6 horas en el caso de AVHRR y cada 15 minutos en el caso de GOES. En el primer caso, los tiempos de renovación de imágenes excede el tiempo de llegada de nubes de ceniza en condiciones de baja intensidad de vientos (5 horas con vientos de 5 nudos). En el caso de las imágenes GOES es que no tienen la resolución para diferenciar una nube meteorológica de una nube de cenizas (excepto en condiciones favorables de tiempo) y tampoco tiene resolución para diferenciar una nube de cenizas de una nube de gases y bajo contenido de cenizas, razón por la que existe la posibilidad de crearse falsas alarmas. Una de las limitaciones más grandes de estos sensores remotos es que no es posible distinguir las nubes de cenizas en condiciones nocturnas y alta nubosidad durante la época de lluvias y huracanes que abarcan al menos 5 meses al año. Por otra parte, los radares hidrometeorológicos no son capaces de distinguir entre granizo, gotas de lluvia y de ceniza, lo cual dificulta su uso en condiciones nocturnas, de alta nubosidad y presencia de lluvia. Particularmente, son difíciles de aportar información una vez que la nube de cenizas se aleja de la fuente de emisión.

Los estudios requeridos deben estar dirigidos a la aplicación de técnicas que usen instrumentos LIDAR y radares diseñados específicamente para la detección de cenizas, usados conjuntamente con perfiladores de vientos. Los costos de estos recursos tecnológicos es alto, pero la relación costo-beneficio es favorable para hacer la inversión si se toman en cuenta los altos costos de la afectación a aeronaves y instalaciones aeronáuticas, sobre todo, si tomamos en cuenta que su uso permitiría evitar la pérdida de vidas humanas.

Bibliografía

Boeing, 1992, Volcanic Ash Avoidance: Flight Crew Briefing, Customer and training flight operations support.

Casadevall T.J., 1991, Volcanic Hazards and Aviation Safety, FAA Aviation Safety Journal, Volume 2, Number 3, pp. 1-11.

Casadevall T.J., 1993, Volcanic Ash and Airports, Discussions and Recommendations from the Workshop on Impacts of Volcanic Ash on Airport Facilities, Seattle, Washington, 52 pp.

Casadevall T.J., 1994, The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62, pp. 301-316.

Casadevall T.J. De los Reyes P. y Schneider D.J., in press, The 1991 Pinatubo eruptions and their impacts on aircraft operations, in Punongbayan, R. and Newhall, C. G., eds., The 1991 Eruption of Pinatubo Volcano, Philippines, U.S. Geological Survey Professional Paper.

Gourgaud A., Camus G., Gerbe M.-C., Morel J.-M., Sudradjat A. y Vicent P.M., 1989, Eruption of Galunggung (Indonesia): A Case Study of Volcanic Hazards with Particular Relevance to Air Navigation, en: Volcanic Hazards, J. H. Latter (Ed.), pp. 151-162.

Smith W. S., 1983, High altitude conk out, Natural History, 92, 11, pp. 26-34.

Swanson S. E. and J. E. Beget, 1994, Melting properties of volcanic ash, USGS Bulletin, n. 2047, pp. 87-92.

11. ALGUNAS RECOMENDACIONES BASADAS EN EXPERIENCIAS DE OTROS AEROPUERTOS

Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

11.1 Recomendaciones

11.1.1 Evaluar técnicas específicas de mitigación

Las técnicas usadas para limpiar una plataforma de un aeropuerto no son las mismas para limpiar un transmisor. Las técnicas usadas para mantener unas computadoras en línea y trabajando, son probablemente las mismas, que se usarían para mantener un receptor VHF operando. De modo que es necesario planear estas estrategias específicas y darse cuenta que la combinación de las estrategias nos dará resultado.

11.1.1 Evaluar experiencias previas

Es importante estar abiertos a nuevas estrategias, sugerencias y recomendaciones, así como crear una biblioteca de información y documentación. Esto permitirá dialogar en formas efectivas así como atacar el problema de la contaminación por ceniza con respecto a sistemas de comunicación electrónica y de generación de electricidad.

11.2 Plan de Contingencias por Ceniza en un Aeropuerto

11.2.1 Seguridad en Aeropuertos

La mayoría de los trabajadores en un aeropuerto tienen una credencial de identificación electrónica que les permite moverse dentro del aeropuerto. Estos sistemas son eléctrica o electro-magnéticamente activados. Si hay caída de ceniza y se producen cortes en la energía eléctrica, es muy probable que la gran mayoría de las chapas y cerraduras electrónicas no funcionen o fallen.

Equipo necesario para el personal del aeropuerto

- Es importante planear y tener el equipo adecuado a la mano para la mitigación de los problemas por ceniza. Los equipos necesarios son: aspiradoras,, compresores de aire, cepillos, líquidos o compuestos para limpiar

especialmente componentes electrónicas, filtros especiales para los sistemas de aire, filtros en general. Todo este material debe estar disponible. Además, se debe poseer una capacidad robusta de mantenimiento.

- Es necesario tener disponible equipos extra y portátiles de aire acondicionado, generadores, y sistemas de comunicación operados por baterías. Se necesita tener al personal entrenado para el uso de estos equipos así como gente capacitada para arreglar sistemas de comunicación y de generación de electricidad.

11.2.2 Recomendaciones

Apagar equipos no esenciales

- Si no se necesita, apagarlo. La experiencia ha mostrado que los equipos eléctricos atraen las partículas de polvo fino. Esto es más crítico para ceniza volcánica, ya que a menudo está cargada electrostáticamente.

Cubrir los equipos

- Como hemos oído repetidamente, la ceniza se deposita en los equipos. Se puede prevenir el daño a los equipos, simplemente cubriéndolos, de modo que la ceniza no se deposite o entre en ellos. Cubriendo los equipos, se elimina gran parte del problema de la ceniza.

Planear con anticipación

- Es necesario identificar y dar prioridades para los equipos y recursos necesarios antes de que se manifieste una situación de emergencia. Necesitamos identificar y planear la estrategia de mitigación. Esto significa dar prioridad a la mitigación y las estrategias de limpieza.

11.2.3 Planes de trabajo

Con base en las recomendaciones de un grupo de investigadores y de autoridades aeroportuarias (53 participantes del grupo de trabajo “Volcanic Ash and Airports” , USGS, open file report), se definieron los siguientes grupos y las listas de puntos importantes para diferentes áreas de los aeropuertos, en respuesta a la ceniza volcánica.

Grupo de Trabajo I: **Superficies**

1. Planeación y Organización
 - Identificación de la cadena de comando
 - Establecimiento de un centro de control y de comunicaciones
 - Publicación sobre las propiedades físicas de la ceniza
 - Riesgos a la salud y ocupacionales por ceniza
 - Equipo disponible en el corto plazo
 - Personal disponible

- Priorización de las áreas que requieren limpieza
 - Personal y equipo disponibles en el largo plazo
 - Definición del problema: espesor, extensión, vientos y metas
 - Logística, alimentación, transporte.
2. Limpieza de las pistas primero; movimiento de aviones hacia y de la terminal
- Sacudir o limpiar ceniza (con acumulación menor a 5 milímetros)
 - Uso de barredoras mecánicas, mientras esté seca la ceniza
 - Acumulación (más de 5 milímetros)
 - i. Comenzar en la parte central de la pista
 - ii. Mojar la ceniza y acumularla en montículos o dunas
 - iii. Limpiar las superficies con mangueras de alta presión
 - Para el caso de ceniza seca; mojar la ceniza para controlarla, acumularla en montículos; cargarla y removerla.
 - Usar emulsiones para estabilizar las dunas, montículos y las entrepistas.
3. Mover la ceniza únicamente una vez
- Identificar el sitio final de acumulación (tiradero) de ceniza
 - Documentar el volumen, usarla como agregado en el futuro
 - Aprobar el sitio (tiradero) de acumulación
 - Cubrirlo con emulsión o con suelo; sembrarlo
 - Observar las reglas locales para el manejo y disposición de la ceniza.
4. Equipo
- Palas mecánicas
 - Camiones de volteo
 - Barredoras
 - Bobcats
 - Camiones cisterna
 - Mangueras de bomberos y bombas de alta presión
 - Rociadores de emulsiones
 - Equipo móvil de comunicación
 - Servicios móviles de: combustible, médicos, de alimentación y agua, sanitarios
 - Guantes, máscaras, lentes protectores, combustible, filtros de aire para vehículos, palas, escobas, y bolsas biodegradables.
5. Recomendaciones
- Conozca sus instalaciones
 - i. Pendiente de la pista
 - ii. Patrones de drenaje
 - iii. Cableados y ductos subterráneos
 - Planee; lleve a cabo simulacros de escritorio; replanee
 - Establezca una línea de autoridad fuerte
 - Capacidad de comunicación robusta
 - Identifique los tanques y depósitos de agua, volumen y calidad
 - Incluya las operaciones aeroportuarias en los simulacros de desastres regionales
 - Haga el manejo de ceniza parte de un plan establecido de emergencias

- Esté dispuesto a cortar burocracia para actuar correctamente
 - Documente la limpieza; designe a una persona responsable de la documentación y de las fotografías.
6. Investigue necesidades
- Aspiradoras y barredoras efectivas
 - Procedimientos para lodos
 - Productos emulsificantes
 - Propiedades ingenieriles y físicas de la ceniza, en forma resumida
 - Pruebas de fricción con ceniza en las pistas
 - Mejoramiento en el corto plazo del movimiento observable y predictivo de nubes de agua y de ceniza
 - Modelos predictivos de caída de ceniza
 - Bandas temporales de acarreo, como las usadas en las minas.

Grupo de Trabajo II: **Sistemas Electrónicos y de Comunicaciones**

1. Problemas principales
 - Contaminación de componentes (la ceniza es corrosiva, abrasiva y conductora)
 - La abrasión daña las partes que se mueven o que rotan (discos, cabezas, interruptores)
 - Operación anómala de equipo
 - i. Daños en discos duros
 - ii. Caídas de sistemas
 - iii. Problemas con transientes y picos eléctricos.
2. Equipo
 - Aspiradoras
 - Sistemas de aire comprimido
 - Cepillos, toallas para limpiar, etc.
 - Componentes o líquidos para limpiar
 - Plástico adherible, bolsas, cinta, etc.
 - Materiales extra consumibles
 - Generadores auxiliares
 - Equipo de comunicación operado por baterías
 - Capacidad de mantenimiento
 - i. Capacidad de un cuarto limpio (instalado o de rápida instalación)
 - ii. Aire acondicionado suplementario.
3. Personal
 - Personal extra para limpieza general y mitigación
 - Técnicos electrónicos para limpieza/repación de equipo
 - Personal adicional, entrenado para limpieza de subestaciones eléctricas, transformadores, etc.
4. Recomendaciones

- Principio general: equipo o sistemas no esenciales, deberán ser apagados y cubiertos con bolsas o plástico
- Planeación con anticipación, es vital
- Identificar los recursos necesarios
- Priorizar equipos o sistemas necesarios
- Pre-almacenar y localizar partes de repuesto y artículos para mitigación
- Identificar y planear la mejor combinación de técnicas de mitigación (dependiendo de las instalaciones, recursos y circunstancias).

Grupo de Trabajo III: **Servicios de Emergencia**

1. Problemas principales
 - Complacencia
 - Poco dinero
 - Equipo no adecuado
 - Personal inadecuado para labores de adiestramiento
 - Disposición final de la ceniza
 - Metodología para la remoción de la ceniza
 - Cuidado de los pasajeros
 - Cuidado del personal
 - Establecimiento de las prioridades
2. Personal y equipo
 - Equipo especial para remoción de ceniza
 - Operadores especiales de equipo
 - Recursos adecuados
 - Equipos de operación simple: palas, escobas, bolsas, mascarar
 - Seguridad del personal, equipo para el cuidado de la salud
 - Espacio para almacenamiento
 - Materiales varios, filtros, lentes de protección, etc.
 - Equipos auxiliares para la generación eléctrica.
3. Resumen
 - La ceniza no es lo mismo que lluvia o nieve
 - Evitar el exceso de agua
 - La ceniza pesa, moverla sólo una vez
 - El riesgo es real, planear anticipadamente y practicar
 - Inventariar sus necesidades – equipo y personal
 - Evaluar el riesgo de su área
 - Ser flexible
 - Si puede: apáguelo, ciérrelo y cúbralo
 - Evalúe los edificios y estructuras.
4. Recomendaciones
 - Agencia coordinadora por área / respuesta amplia a la actividad
 - Recursos competentes por parte de la Agencia de Federal de Transportes
 - Plan por ceniza; Plan escrito para cada aeropuerto
 - Evaluación local del riesgo o situación

- Reuniones para presentar innovaciones a los equipos o procedimientos
- Sistema de respaldo para la energía eléctrica
- Evaluación del riesgo
- Comunicaciones
- Información técnica actualizada
- Respuesta del personal al trabajo
- Demanda múltiple en vehículos de asistencia médica o de incendios
- Disponibilidad de electricidad.

Grupo de Trabajo IV: Equipos de Apoyo para Operaciones en Tierra y Aviones

1. Resumen

- Planear con anticipación
- Comunicación
- Operación de equipo para minimizar daños
- Mantenimiento y servicios más frecuentes
- Protección del personal y del equipo
- Limpiar, limpiar y limpiar.

2. Problemas

- Daño a partes móviles
- Falla de equipo
- Equipos de seguridad en riesgo
- Equipos no diseñados para la remoción de ceniza (remoción de nieve vs. remoción de ceniza)
- Accesorios y equipos: partes de repuesto, equipo protector y para limpiar

3. Recomendaciones

Caída inminente de ceniza

- Comunicaciones con respecto a la caída de ceniza (Alertamiento temprano, actualizaciones constantes de la situación)
- Precauciones contra la ceniza – donde comenzar

- Inventario de equipo – recolección de datos
 - Qué está trabajando
 - Qué se tiene que cubrir
 - Qué equipo es necesario – agua, aceite, filtros, cinta, plástico
- Mover los aviones fuera del área en riesgo, si es posible
- Colocar aviones en área de riesgo en hangares, si es posible
- Personal
 - Llamada automática al personal
 - Comida y equipos para el personal
 - Almacenamiento de equipo, priorizar el sitio, último adentro, primero afuera.

- iii. Contactos para contratar personal, equipos en renta y componentes
- iv. Designación de grupos de trabajo e indicaciones al personal
- Localización de almacenamiento de agua para reabastecimiento
- Equipos
 - i. Inventariar equipo protector
 - ii. Preparar paquetes de plástico adherible y cintas
- Mantenimiento
 - i. Envolver, cubrir y sellar todos los orificios de los aviones que permanecen en el área
 - ii. Estabilizar aviones (i.e. detener por la cola, usar balastas o amarres)
 - iii. Revisar las recomendaciones de los fabricantes
 - iv. Cubrir los equipos / Proteger todo lo que no se usa
 - v. Juntar todos los repuestos y partes de reemplazo
 - vi. Mantenimiento general a todos los equipos que se usaran
 - vii. Servir y reabastecer: agua, aceite, filtros, etc.
 - viii. Revisar equipos (¿El equipo almacenado esta en condiciones adecuadas de operación).

Durante la caída de ceniza

- Ejecutar las acciones recomendadas de caída inminente de ceniza, si no se realizaron previamente
- Proteger al personal (máscaras respiratorias, lentes protectores, equipo de seguridad)
- Mitigar los riesgos de seguridad
- Minimizar el uso de equipo, si se tiene que usar; protegerlo como se pueda (cambiar aceite, filtros, dar servicio)
- Planear y preparar operaciones de seguimiento
- Posicionar el equipo para un uso seguro y conveniente
- Minimizar el uso de aviones
- Se deben considerar criterios de seguridad especiales durante la caída de ceniza (la ceniza mojada es resbalosa y pesada)
- Monitoreo del equipo – revisar los itinerarios de mantenimiento
- Monitoreo del buen funcionamiento de los equipos de emergencia y de generadores
- Monitoreo de daños – reparación de áreas selladas, como sea necesario
- Considerar ideas novedosas para el mantenimiento preventivo
- Considerar la rotación de equipo
- Monitoreo de la cantidad de caída de ceniza en los aviones (limpiar, si es apropiado)
- Evitar la acumulación excesiva de ceniza en los aviones
- No volar aviones cuando esté cayendo ceniza.

Después de la caída de ceniza

- Limpiar de arriba a abajo (techo a piso)
- Evaluar el estado del equipo

- Evaluar el daño
- Localizar equipo necesario – dar prioridad al equipo de apoyo en tierra
- Coordinar el apoyo de equipo con la Administración General del Aeropuerto
- Evaluación constante de la condición de los equipos
- Revisar los itinerarios de mantenimiento
- Revisar los inventarios – qué está trabajando
- Minimizar el uso de equipos
- Seguir las recomendaciones del fabricante
- Hacer énfasis en las consideraciones a la seguridad del personal
- Localizar equipos – coordinar el uso con otras operaciones en el aeropuerto
- Improvisar equipo, como sea necesario
 - i. Uso de tabloneros para palear ceniza o para las palas mecánicas, uso de medias de nylon como filtros
- Minimizar movimientos que creen peligro de ceniza o levantamiento de ceniza
- Hacer énfasis en medidas de seguridad, como ceniza mojada resbalosa
- Mantener el equipo no utilizado, envuelto o sellado o darle mantenimiento cuando el riesgo por ceniza haya pasado
- Mover el equipo eléctrico/electrónico fuera de las zonas donde ocurriera caída de ceniza, si es posible
- Seguir las instrucciones recomendadas por los fabricantes
- Aumentar las inspecciones de mantenimiento para operaciones continuas
- Minimizar el soplado o movimiento brusco de la ceniza, cerca de las aeronaves

Grupo de Trabajo V: **Sistemas Electrónicos**

1. Servicios de Cómputo

La táctica más recomendada, es apagar todos los sistemas electrónicos y de cómputo, hasta que la ceniza fuera retirada completamente del área y del equipo. Las cabezas de las computadoras y de los discos – y cualquier circuito de alto voltaje – son especialmente vulnerables a la ceniza y al daño. El limpiado continuo y la protección estricta de los sistemas de cómputo permitirán que las operaciones continúen, en todas, menos en las caídas mas fuertes de ceniza.

Mitigación: La mejor táctica para la mitigación del polvo, es la prevención. Hay que acondicionar y limpiar el aire que rodea los equipos para evitar el polvo. Se ha encontrado que los filtros de tela de algodón (usados en cuartos limpios), funcionan muy bien, sólo que reducen el flujo del aire. Otra solución es el usar ventiladores grandes, para mantener el flujo de aire necesario. Los equipos montados en gabinetes pueden ser modificados para añadirles un ventilador; los instrumentos o equipos con componentes que incluyan ventiladores requerirán un cambio de diseño para incrementar la capacidad del ventilador. Se pueden usar ventiladores con forma de corneta, para incrementar el área, pero reducen el flujo del aire en sólo un 20 %.

Los circuitos digitales integrados pueden variar entre un 5-10 por ciento en su desempeño (dependiendo del tipo de circuito) y aún así ser aceptables. Es difícil generalizar acerca de otros equipos (por ejemplo, sistemas de suministro de alto voltaje).

Humidificar el ambiente (mojando las alfombras) ayuda a controlar el polvo.

El polvo del equipo puede ser removido con aire comprimido. Si el aire es muy seco, las descargas estáticas podrían dañar equipos o componentes sensibles (por ejemplo, circuitos integrados MOS). Si el aire está demasiado húmedo, el polvo se pegará. La humedad relativa de un 25-30% es la mejor para el uso del aire comprimido.

La limpieza con una mezcla presurizada de agua y detergente, y un enjuague con agua caliente es bastante efectiva. Pero de cualquier manera, este procedimiento requiere de un desensamble parcial.

El polvo en los circuitos digitales no causa mucho problema por el bajo voltaje con el que se trabaja. En cambio, los circuitos de alto voltaje o de alta impedancia son muy vulnerables al daño causado por polvo semi-conductor. El polvo es ácido, conductor y corrosivo.

El polvo debe ser quitado de suministros de poder y CRTs (especialmente los de alto voltaje o de capacitores). El polvo puede tener una carga estática, lo que lo hace difícil de retirar, requiriendo un cepillado para despegarlo.

Hay que usar prefiltros para mejorar el filtrado.

Cambiar a filtros absolutos, lo que evitará todas las partículas de hasta una micra de tamaño.

Mantener encendida la computadora para operar los filtros, pero no accesar los discos.

Mantener la configuración de “un cuarto dentro de un cuarto”; restringir el acceso; recircular el aire; acelerar la limpieza del área.

2. Sistemas de Comunicación

Excepto por los cortos circuitos debido a la conductividad del polvo y la abrasión de partes móviles, son pocos los problemas serios que se han informado con respecto a los radios.

Mitigación: los aislantes de teflón en las antenas de comunicación que han sido o que fueron cubiertos por polvo provocaron cortos. Ha sido difícil limpiarlos, ya que el residuo se adhería. Se requirió el reemplazo con aislantes de cerámica.

Los interruptores de plástico o los de botones se desgastan rápidamente; ha sido necesario reemplazarlos.

Sellar las estaciones repetidoras y otras instalaciones; cerrar las entradas de aire o ventilas; la circulación interna del aire deberá ser suficiente para el enfriamiento.

Usar aire comprimido o aspiradoras para limpiar equipos de radio.

Sellar el equipo que no sea a prueba de agua. Las unidades pequeñas consumen poca corriente y, por tanto, se calientan poco.

Las partículas magnéticas se pegan a los relevadores y hay que quitarlas con aire comprimido.

No se debe permitir que se humedezca el equipo.

Limpiar el equipo diario; Se debe incrementar el uso de papel filtro.

Limpiar los platos de microondas, bocinas y guías de ondas; se pueden utilizar lonas de plástico en caso de emergencia.

Estas técnicas están basadas principalmente en equipos de comunicación comerciales y reflejan las circunstancias de operación civil. Algunos equipos militares difieren en su configuración, en requerimientos de electricidad y de parámetros de operación.

3. Sistemas Ópticos y de Radar

La mayoría de los equipos de radar fueron apagados durante las caídas fuertes de ceniza, de modo que se registraron pocos problemas con estos sistemas, con excepción de la limpieza del polvo y el control del polvo residual. La táctica de mitigación más simple fue detener las operaciones.

Mitigación: Los circuitos de alto voltaje pueden experimentar cortos. Es necesario reparar y limpiar.

Lavar los rotores de las antenas, los baleros; relubricar; y cubrir las partes expuestas.

El polvo en las componentes ópticas deberá ser removido con aire comprimido o lavado con cantidades copiosas de agua. No hay que tallar o cepillar, ya que esto puede rayar las componentes ópticas.

Tener cuidado de no lavar el polvo de las monturas de los equipos ópticos en los aviones (por ejemplo, el sextante). El polvo se meterá en las monturas o bisagras.

Apagar las componentes no esenciales del equipo de radar, para bajar la demanda de enfriamiento y de carga eléctrica.

Reducir los requerimientos de las operaciones de desempeño.

Transferir el cubrimiento de radar a otras instalaciones; combinar sectores.

Remover y reemplazar los baleros de la cámara y limpiar los engranajes.

Proteger los sistemas de video grabado del polvo; el polvo causa brincos o rayones en la cinta.

4. Sistemas de Energía Eléctrica

Los sistemas de suministro de energía, ya sean de fuentes comerciales o por generadores, es esencial para casi cualquier actividad. La caída de polvo o ceniza puede dañar o perjudicar los sistemas de distribución eléctrica, debido a la tierra física causada por el polvo conductivo mojado. Los sistemas de transmisión son menos vulnerables a la contaminación por ceniza, debido a los altos voltajes y a las diferentes configuraciones de aislamiento involucradas. Generalmente hablando, se requiere de una acumulación muy grande de polvo para producir daños significativos con apagones. Los apagones ocurren cuando se utilizan generadores que son bastante vulnerables al daño por polvo.

Mitigación: Usar aire comprimido para limpiar aislantes, conectores, escobillas e interruptores.

Lavado con agua a presión (60-150 psi); si se usa muy alta presión (2000 psi) se usa menos agua, pero tarda más.

Las líneas y las subestaciones deberán ser de-energizadas antes de ser lavadas. Mojar el piso en la subestación, antes de limpiar las líneas.

Cubrir los aislantes con grasa de silicón; aunque esto requiere de una aplicación manual y de limpieza también manual.

Algunos incidentes (menos del 5 %) de descarga capacitiva cuando los aislantes con silicón fueron cubiertos por polvo.

Será necesario lavar y tallar para remover los residuos.

Golpear o cepillar el polvo suelto de los equipos en las subestaciones o de las estructuras.

Soplar primero el polvo y luego lavar; el polvo que se ha mojado y luego secado es mucho más difícil de quitar.

Instalar un tanque de agua y una bomba en un helicóptero. Se pueden limpiar más estructuras rápidamente. No es necesario de-energizar las líneas.

Usar vientos para limpieza autónoma:

- 25 km/h: 5% de polvo retirado
- 40 km/h: 90% de polvo retirado
- 55 km/h: sólo queda una traza de polvo.

Los compuestos de plástico de los aislantes, que han sido quemados y fundidos por descargas, deberán ser reemplazados por aislantes de cerámica.

Mitigación: (Generadores auxiliares):

Almacenar filtros.

Añadir filtros (30% de eficiencia) a los generadores; cambie frecuentemente.

Instalar mangueras en las tomas de aire; levante las tomas, lejos del nivel del suelo.

Limpiar los radiadores con aire comprimido.

Instalar circuitos de alarmas para advertir de presiones diferenciales excesivas entre los filtros.

Sellar fuera de las entradas de aire, cuando no se usen.

Mantener los generadores en arranque manual y dependa de sistemas in-interrumpibles de corriente lo más que se pueda durante posibles cortes; esto protegerá los generadores con poco o nada de filtros.

Las turbinas de gas deberán ser limpiadas por dentro y por fuera con agua y con detergentes de uso rudo. Los filtros que se lavan con agua deberán ser limpiados periódicamente.

Instale sistemas de tres pasos para los filtros de las turbinas de gas:

- Separador inercial
- Pre-filtro
- Filtro de alta eficiencia; remueve 95 % de partículas de hasta 2 micras.

Expulsión inversa automática para limpiar a una presión diferencial de entre 15 y 23 cm (6 y 9 pulgadas).

Instale circuitos de protección para los filtros en turbinas de gas:

- alarma a 6 pulgadas de presión de vacío
- apagado de turbina a 9 pulgadas de presión de vacío
- los filtros colapsan a 12 pulgadas de presión de vacío.

11.2 Bibliografía

Casadevall, Thomas, J. "The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations". Journal of Volcanology and Geothermal Research No. 62, pp 301-316, 1994.

"Volcanic Ash and Airports", Reporte Especial del United States Geological Survey, Open File Report 93-518. 1993.

11.3 Algunas recomendaciones para nuevos aeropuertos

- Considerar el diseño estructural de los techos para evitar la acumulación de la ceniza.
- Ductos de entrada a los sistemas de aire acondicionado localizados lejos del piso, con tomas de aire no orientadas hacia arriba y en zonas de poca probabilidad de acumulación de ceniza.
- Sistemas de almacenamiento de agua con capacidad mucho mayor, en caso de que se requiera agua para la limpieza de pistas y de terminales.
- Sistemas de drenaje que puedan contener una mezcla de agua con ceniza, además de tanques de decantación para la eliminación de cenizas.
- Zona de entre-pistas con vegetación o material especial para que permita que la ceniza sea removida de ese sitio de forma fácil, ó que capture la ceniza en forma definitiva, ya que de otra forma la turbulencia generada por los aviones levantará de nuevo la ceniza de esa zona.
- Equipos especiales para la remoción de la ceniza de pistas y zonas de circulación de aviones. Considerar que la remoción de ceniza no es lo mismo que remoción de agua o nieve.
- Considerar sistemas centrales de aspirado para la remoción de ceniza.
- Equipos especiales de suministro de energía en caso de emergencia, que no sean afectados por ceniza.

11.4 Conclusiones

- Lo mejor es apagar, cerrar y cubrir todo el equipo.
- Es necesario prever los escenarios de caídas de ceniza y llevar a cabo simulacros.
- Es muy importante tener almacenado equipo y material para la remoción de la ceniza en las zonas de pistas, andenes, equipos y edificios.
- Tener personal capacitado y especializado en contingencias de ceniza volcánica.
- Considerar la posible eventual presencia de ceniza volcánica en el diseño del nuevo aeropuerto tanto en Texcoco como Tizayuca, para mitigar su efecto.

12. SUMARIO

Las operaciones aeronáuticas se han incrementado a escala global y, por ello, han aumentado su vulnerabilidad ante la presencia de nubes de cenizas producidas por diversos volcanes. Los efectos de las cenizas en las aeronaves en vuelo pueden dañar de manera severa diferentes componentes de las aeronaves. Las instalaciones aeroportuarias pueden ser afectadas fuertemente, particularmente las pistas, instalaciones estratégicas, así como sistemas de comunicación, electrónicos y de cómputo.

En México, las nubes de ceniza del volcán Popocatépetl han afectado a las aeronaves en vuelo, a las instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por emisiones importantes y también por falsas alarmas (las cuales se deben a limitaciones en las metodologías para la detección de nubes de ceniza). Los encuentros de las aeronaves con nubes de cenizas han ocasionado daños a partes diversas, en particular a los parabrisas, pero no han producido daños severos a turbinas.

Con base en lo anterior, en este documento se ha abordado la problemática de las cenizas volcánicas del Popocatépetl, así como sus efectos en la aeronavegación y en la infraestructura aeroportuaria de la zona.

Para entender el comportamiento del Popocatépetl, se ha incluido una descripción de los episodios de actividad desde el siglo XIV hasta el presente. De ella se puede concluir que si el tipo de actividad que se desarrolla en la actualidad es de la misma naturaleza que la desarrollada en los 12 episodios previos reportados desde el siglo XVI, es posible que las emisiones actuales puedan mantenerse por un períodos de varios meses a varios años, sin generar mayores consecuencias. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el potencial de que se desarrolle una erupción magmática explosiva de mayor magnitud existe, y que si bien la probabilidad de ocurrencia de tal desarrollo es relativamente menor a la del evento fumarólico, el riesgo que representa requiere sea considerada seriamente en los planes de preparación y en cualquier otro plan de desarrollo nacional o regional. Es, bajo esta lógica, que resulta importante considerar al fenómeno de las cenizas volcánicas en la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria de la zona vecina al Popocatépetl.

Se ha señalado que dos de las manifestaciones de la actividad del Popocatépetl son los fragmentos balísticos y la emisión de ceniza. Sobre los primeros, a partir de las altitudes calculadas de su alcance, se desprende que las aeronaves no deben sobrevolar el cráter a una altitud, sobre el nivel medio del mar, menor a 8 km.

Por lo que respecta a la ceniza, se señaló que las nubes hasta el momento y con algunas excepciones, se han caracterizado por una baja concentración de

partículas y una alta concentración de gases. La lluvia de cenizas se han concentrado principalmente en los primeros 30 km alrededor del volcán y ocasionalmente llegan a más de 50 km, precipitándose en instalaciones aeroportuarias. En promedio, las cenizas volcánicas tienen tamaños entre 50 y 100 micras a 50 km del volcán y de 400 micras a distancias entre 4 y 20 km (dependiendo de la explosividad del evento). Además, como resultado de grandes erupciones pasadas se han encontrado espesores de varios cm de ceniza caída hasta 100 km de distancia. En contraste, en erupciones pequeñas como las actuales, estos espesores se reducen a milímetros. Las cenizas actuales del volcán Popocatépetl son rocas volcánicas pulverizadas, de tipo andesítico, compuestas principalmente de fragmentos de los domos, algunos cristales y en pocas ocasiones pómez. Para definir las características específicas de los sitios en los cuales se ha encontrado ceniza, se ha recomendado llevar a cabo un estudio de campo y laboratorio más detallado, de mapeo y muestreo con control estratigráfico.

Puesto que la caída de ceniza depende, entre otros factores, de la dirección del viento en la cercanía del volcán, se discutieron los patrones del viento en la zona. Se presentaron las tendencias de los vientos superficiales y superiores, así como la posible distribución geográfica de la tefra y del material piroclástico.

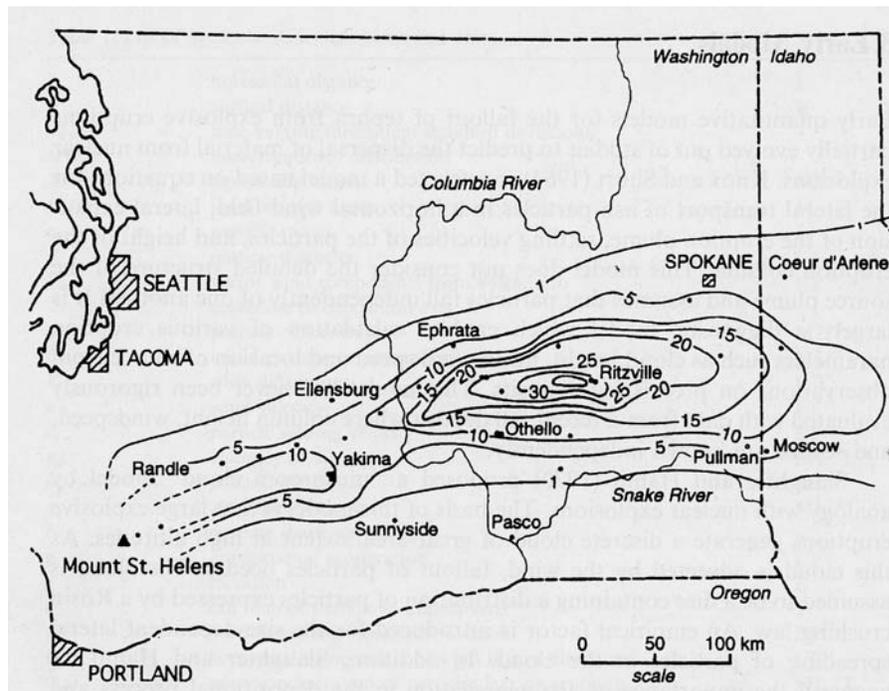
Los sistemas de monitoreo y vigilancia de volcanes son una herramienta indispensable que, además de permitir conocer la actividad de un volcán, permiten detectar, en forma oportuna, emisiones importantes de ceniza. Para el caso del monitoreo del volcán Popocatépetl se cuenta con un moderno sistema que fue descrito en su oportunidad. Si bien este sistema ha proporcionado información muy útil para la toma de decisiones, se ha recomendado la instalación de más cámaras de video que permitan hacer un seguimiento visual de mayor alcance y posición.

En el documento se destaca la importancia de los radares hidrometeorológicos en el rastreo continuo de nubes de ceniza en casi cualquier condición de tiempo. Desafortunadamente el CENAPRED ya no cuenta con esta herramienta debido a un desperfecto en la unidad que temporalmente se operaba conjuntamente con el USGS. Es, por tanto, necesario buscar los recursos o el financiamiento para un nuevo radar con características idóneas para detectar, seguir y alertar sobre nubes de ceniza a la aeronavegación de la zona. Asimismo, se ha considerado conveniente mejorar e implementar la detección temprana de estas nubes, dados los tiempos tan limitados de reacción y activación de planes de emergencia. Se propone desarrollar estudios dirigidos a la aplicación de técnicas que usen instrumentos LIDAR.

Un objetivo central de este trabajo fue el análisis de posible escenarios de formación de depósitos de ceniza producto de erupciones del Popocatépetl. Para ello se utilizó un modelo numérico que, si bien ha demostrado su capacidad de reproducir escenarios de depósitos producidos por erupciones de diversos volcanes, no puede reproducir todos los procesos que controlan el desarrollo, dispersión y caída de las partículas que conforman una nube volcánica. No obstante esta limitación, se considera que pueden sustraerse algunas conclusiones acerca de los escenarios de acumulación de ceniza que podrían esperarse en las

regiones de interés para diferentes tipos de potenciales erupciones del volcán Popocatepetl. Estas son:

- En todos los casos de escenarios de relativa mayor probabilidad (alturas de columna menores de 15 km sobre el nivel del mar), los máximos espesores de ceniza depositada esperados no cambian en forma muy significativa en el rango de distancias de la región de estudio que incluye a los dos lugares propuestos para la construcción del nuevo aeropuerto.
- En los casos de relativamente menor probabilidad, correspondientes a erupciones de gran escala (i.e., alturas de columna mayores de 15 km sobre el nivel del mar), los espesores esperados en ambos sitios de interés para construir el nuevo aeropuerto impedirían por completo cualquier operación aeronáutica. En situaciones de este tipo, puede incluso presentarse una distribución completamente distinta de los espesores de los depósitos obtenidos del modelo, dado que efectos, como la agregación de partículas, no están incluidos en éste. Este tipo de efectos podría producir dos o más máximos de espesor a distancias variables del centro eruptivo. Este tipo de efectos se observaron claramente en los depósitos resultantes de la erupción del 18 de mayo de 1980 del volcán Santa Elena, en el estado de Washington, en los Estados Unidos de América. En la figura siguiente¹ (Carey y Sigurdsson, 1982) se muestra una distribución bimodal, en la que se forma un segundo máximo del espesor de los depósitos a una distancia aproximada de 300 km del volcán.



¹Fig. 1. Mapa de isopacas (líneas de igual espesor de ceniza depositada) de la erupción del volcán Mt. St. Helens del 18 de mayo de 1980. Los contornos están en mm. Nótese el segundo máximo a unos 300 km al ENE del volcán.

Referencias

Carey S, Sigurdsson H. (1982) Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 87: 7061-7072.

González Mellado A.O. (2000). Modelo Semiempírico de Depósitos de Caída en Volcanes. Tesis MC. UNAM. 230. pp

Para precisar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de situaciones alrededor del volcán Popocatépetl se ha recomendado realizar estudios geológicos de los depósitos de materiales volcánicos de erupciones pasadas en el área de interés.

Finalmente, en este documento se ha hecho una revisión de la literatura sobre las experiencias en el manejo de cenizas en otros aeropuertos de mundo. Al respecto, se presentaron algunas recomendaciones para la operación y construcción de aeropuertos. La lista de recomendaciones no pretende ser exhaustiva y sólo debe ser considerada como indicativa del tipo de precauciones, acciones y procedimientos en la materia. En este sentido, se ha recomendado implantar un sistema de intercambio de información sobre eventos que involucren cenizas entre las líneas aéreas que operan en México y los fabricantes de aeronaves, así como realizar estudios para conocer las temperaturas de fusión de las cenizas del Popocatépetl.

Se considera que este documento es un primer acercamiento a la problemática planteada y se refuerza la conveniencia de desarrollar los estudios que han sido propuestos.

"Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria"
Se terminó de imprimir en diciembre de 2001, en los Talleres Gráficos de México, Av. Canal del Norte N° 80, Col. Felipe Pescador, México, D.F. La edición en papel bond de 90 grs. en interiores y portada en cartulina sulfatada de 14 puntos, consta de 300 ejemplares más sobrantes para reposición.

SEGOB
SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN



SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Del. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.cenapred.gob.mx
www.proteccioncivil.gob.mx