

MAPAS DE PROBABILIDAD PARA IDENTIFICAR INFRAESTRUCTURA AEROPORTUARIA EN RIESGO POR CENIZA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Dr. José Carlos Jiménez Escalona^{1,*}, M.E. Roberto Sánchez Escobar^{2,†},
Ing. Itzel Daniela Díaz Rodríguez¹, Ing. Luis Ángel Prieto Saldívar¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

²Escuela Nacional de Protección Civil, Campus Chiapas. Carretera Ocozocoautla – Tuxtla Gutiérrez. km. 1.5 Antiguo Aeropuerto Llano San Juan, Ocozocoautla de Espinoza, Chiapas, México.

Recibido: 5/septiembre/2025

Aceptado: 12/diciembre/2025

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i2.22040>


RESUMEN

La actividad eruptiva del volcán Popocatepetl representa un riesgo significativo para la aviación civil en el centro de México, debido a la posible dispersión de ceniza volcánica en niveles de vuelo comerciales y su deposición en infraestructura aeroportuaria. Este estudio presenta una metodología para identificar aeródromos y helipuertos potencialmente afectados por nubes de ceniza, mediante el uso de mapas de probabilidad generados a partir del modelo de dispersión HYSPLIT, datos meteorológicos históricos y más de 4,700 eventos eruptivos reportados entre 1999 y 2023. Los resultados muestran una clara estacionalidad en los patrones de dispersión: de noviembre a mayo, los vientos predominantes transportan la ceniza hacia el este, afectando principalmente instalaciones en Puebla, Veracruz y Morelos; mientras que, de junio a octubre, la dispersión se dirige al oeste, impactando regiones con alta densidad aeroportuaria como la Ciudad de México y Toluca. Se identificaron 84 instalaciones aeronáuticas con una probabilidad de afectación igual o superior al 10%, lo que evidencia la necesidad de integrar estos mapas en los protocolos de gestión del riesgo volcánico y en la planificación operativa aeronáutica. La metodología propuesta permite anticipar escenarios de afectación y priorizar acciones preventivas, contribuyendo a la seguridad operacional y a la resiliencia del sistema aeronáutico ante eventos volcánicos.

Palabras clave: Riesgo operacional; Ceniza volcánica; Mapa de probabilidad; Navegación aérea; Infraestructura aeroportuaria.

ABSTRACT

The eruptive activity of the Popocatepetl volcano poses a significant risk to civil aviation in central Mexico due to the potential dispersion of volcanic ash into commercial flight levels and its deposition on airport infrastructure. This study presents a methodology for identifying aerodromes and heliports at risk of ashfall, using probability maps generated from the HYSPLIT dispersion model, historical meteorological data, and over 4,700 eruptive events reported between 1999 and 2023. The results reveal a

*jjimeneze@ipn.mx  <https://orcid.org/0000-0001-9309-5245>

†sanchezescobarroberto@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-6059-0338>

clear seasonal pattern in ash dispersion: from November to May, prevailing winds carry ash eastward, affecting airports mainly in Puebla, Veracruz, and Morelos; while from June to October, ash dispersion shifts westward, impacting highly trafficked regions such as Mexico City and Toluca. A total of 84 aviation facilities were identified within areas with a probability of ash impact equal to or greater than 10%, underscoring the importance of incorporating these maps into volcanic risk management protocols and airspace planning. The proposed methodology provides a reliable tool for anticipating impact scenarios and prioritizing preventive actions, thereby enhancing operational safety and improving the resilience of the aviation system in the face of volcanic hazards.

Keywords: Operational risk; Volcanic ash; Probability map; Air navigation; Airport infrastructure.

1 Introducción

Las erupciones volcánicas constituyen una amenaza significativa para la aviación moderna debido a los grandes volúmenes de material particulado que es emitido a la atmósfera por este tipo de fenómenos. Este material se genera principalmente al pulverizar roca sólida (magma enfriado y solidificado) produciendo fragmentos de diferentes tamaños. Mientras que los materiales de mayor tamaño y con mayor peso tienden a depositarse cerca del cráter, las partículas más finas con diámetros menores a 100 μm pueden ser elevadas hasta niveles atmosféricos que dependerán de la energía con la que son expulsadas y la altura que alcance la columna hasta estabilizarse térmicamente con la atmósfera, en donde permanecen suspendidas durante periodos prolongados de tiempo que pueden ir de horas hasta días, de acuerdo con su baja velocidad terminal de caída. Este material fino, conocido como ceniza volcánica, puede ser transportado y dispersado por los vientos predominantes en la zona pudiendo recorrer distancias de varios cientos de kilómetros desde su origen, alcanzando extensiones horizontales que pueden abarcar vastas regiones del espacio aéreo (Jiménez-Escalona *et al.*, 2022). La presencia de estas nubes de ceniza representa un grave peligro para las operaciones aéreas, ya que puede dañar motores a reacción, afectar instrumentos de navegación, reducir la visibilidad y comprometer la seguridad estructural de las aeronaves. Aunque en muchos casos no son fácilmente detectables a simple vista o por radar meteorológico, su peligrosidad ha sido confirmada en múltiples incidentes documentados (Casadevall, 1994; Guffanti *et al.*, 2010).

Debido al constante crecimiento del tráfico aéreo a nivel mundial, la probabilidad de que las aeronaves se encuentren con nubes de ceniza volcánica ha aumentado, especialmente en regiones donde se ubican volcanes activos. A lo largo de las últimas décadas, numerosos eventos han demostrado que incluso erupciones de baja a moderada intensidad (Índice de Explosividad Volcánica, VEI 2–5) pueden generar interrupciones significativas en el tráfico aéreo, tanto en vuelo como en tierra (Aydar *et al.*, 2024; Bolić y Žarko Sivčev, 2011; Takebayashi *et al.*, 2021). Además del impacto en el espacio aéreo, la dispersión de ceniza puede afectar directamente a la infraestructura aeroportuaria, incluyendo pistas, plataformas, instalaciones eléctricas y equipos de soporte en tierra. Este tipo de afectación ha generado en múltiples ocasiones cierres temporales de aeropuertos con interrupciones que van desde algunas horas hasta periodos prolongados de días o semanas, dependiendo de la magnitud del evento y de las condiciones meteorológicas locales (Arreeras y Arimura, 2022; Elissondo *et al.*, 2016; Reichardt *et al.*, 2019).

La historia reciente de la aviación incluye numerosos ejemplos de crisis volcánicas con consecuencias operacionales y económicas graves. La erupción del volcán Chaitén en 2008 paralizó el tráfico aéreo regional por semanas (Major y Lara, 2013), mientras que el caso del Eyjafjallajökull en 2010 provocó el cierre de más de 300 aeropuertos en Europa y la cancelación de más de 100,000 vuelos, con pérdidas económicas que superaron los 1.7 mil millones de dólares (Bolić y Žarko Sivčev, 2011). Casos posteriores como las erupciones del Cordón Caulle en 2011, Calbuco en 2015, Monte Agung en 2017, Raikoke en 2019, Sinabung en

2019 y Taal en 2020 han confirmado que estos eventos pueden extenderse durante meses, afectando significativamente la continuidad operativa de la aviación civil (de Leeuw *et al.*, 2021; Elissondo *et al.*, 2016; Romero *et al.*, 2017; Takebayashi *et al.*, 2021).

El radio de afectación de una erupción volcánica depende de múltiples factores interrelacionados, entre los que destacan: la cantidad de material emitido y la duración de la erupción —que puede variar desde minutos hasta varios días—; la altura alcanzada por la columna eruptiva, determinada por la energía liberada y la temperatura de los gases expulsados; y la velocidad y dirección de los vientos en niveles altos de la troposfera, donde suele concentrarse la nube de ceniza. La interacción de estos elementos define la extensión espacial del impacto, que puede abarcar desde algunas decenas de kilómetros en erupciones de baja intensidad, hasta varios cientos o incluso miles de kilómetros en eventos de gran magnitud. Un ejemplo de ello fue la erupción del Eyjafjallajökull en 2010, cuyo radio de dispersión superó los 1800 km y provocó el cierre de gran parte del espacio aéreo europeo, evidenciando la capacidad de este tipo de fenómenos para interrumpir operaciones aéreas a escala continental.

Estos antecedentes han evidenciado que los sistemas aeronáuticos y sus operadores requieren herramientas predictivas más robustas para gestionar el riesgo asociado a la ceniza volcánica. Aunque existen centros especializados, como el Centro de Asesoramiento de Ceniza Volcánica (VAAC, por sus siglas en inglés), sus reportes se elaboran a partir de la información proporcionada por los observatorios vulcanológicos locales en el momento de presentarse una erupción —en México, el CENAPRED es el encargado de reportar la actividad del volcán Popocatepetl— y del análisis de imágenes satelitales geoestacionarias. Con base en estos insumos, el VAAC genera pronósticos de dispersión y seguimiento de las nubes de ceniza para 6, 12 y 18 horas después de la erupción, los cuales resultan útiles para estimar la trayectoria inmediata de las nubes de ceniza.

Sin embargo, sus informes mantienen un carácter principalmente puntual y descriptivo, limitando la capacidad de anticipación a nivel local y aeroportuario. En consecuencia, muchas decisiones operativas (cierres, desvíos, cancelaciones) deben tomarse de manera reactiva, lo que incrementa el riesgo de exposición a condiciones peligrosas o genera pérdidas económicas innecesarias.

En este contexto, se vuelve esencial contar con herramientas que permitan identificar de manera probabilística las zonas más vulnerables del espacio aéreo y de la infraestructura aeronáutica ante una posible erupción. Esta necesidad es particularmente crítica en el centro de México, donde se ubica el volcán Popocatepetl que se encuentra rodeado por múltiples aeropuertos, helipuertos y rutas aéreas de alta densidad. Dado su último periodo de actividad eruptiva que dio inicio desde 1994, el Popocatepetl constituye un caso de estudio ideal para desarrollar y validar metodologías de evaluación del riesgo aeronáutico basado en mapas de probabilidad de afectación por ceniza volcánica.

2 Metodología

El objetivo de esta investigación fue identificar aeródromos y helipuertos con alta probabilidad de ser afectados por la caída de ceniza volcánica dentro de la región de influencia del volcán Popocatepetl. Para ello, se adoptó un enfoque metodológico basado en el análisis probabilístico de la dispersión de ceniza volcánica y su integración con información geoespacial de infraestructura aeroportuaria.

Como insumo principal se emplearon los mapas de probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica desarrollados por Juárez Pérez (2024). Dichos mapas fueron generados mediante el procesamiento geoestadístico de las salidas del modelo de dispersión atmosférica HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Este modelo se utilizó para simular la dispersión de nubes de

ceniza correspondientes a aproximadamente 4,700 eventos eruptivos del volcán Popocatépetl, reportados por la VAAC de Washington durante un periodo de 23 años.

Para la generación de las simulaciones, el modelo HYSPLIT fue alimentado con información específica de cada evento eruptivo, incluyendo la hora de inicio de la erupción y la altitud del tope de la nube de ceniza, datos obtenidos de los reportes del VAAC. Adicionalmente, se emplearon parámetros genéricos incorporados en el propio modelo, como la tasa de emisión de material volcánico, la cual se estima en función de la altura de la columna eruptiva. Las condiciones meteorológicas necesarias para las simulaciones se obtuvieron a partir del conjunto de datos NOAA REANALYSIS 1data.

Las salidas del modelo HYSPLIT fueron validadas mediante la comparación con nubes de ceniza detectadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) por el método de Split Windows descrito en [Jiménez-Escalona et al. \(2022\)](#). Con el fin de estandarizar los resultados y permitir su integración en el análisis probabilístico, todas las simulaciones fueron normalizadas para representar un periodo de dispersión de ocho horas, contado desde el inicio de la erupción hasta la detección de la nube de ceniza.

La construcción de los mapas de probabilidad integró los siguientes componentes metodológicos: (1) el análisis histórico de la actividad eruptiva del volcán Popocatépetl con base en los reportes del VAAC; (2) la recopilación y el procesamiento de imágenes satelitales MODIS correspondientes a los eventos eruptivos; (3) la simulación de las trayectorias de dispersión de ceniza mediante el modelo HYSPLIT; y (4) el análisis de los patrones de viento en niveles superiores de la atmósfera, fundamentales para comprender el transporte y el alcance espacial de las nubes de ceniza. Como resultado de este proceso se generaron doce mapas de probabilidad, cada uno representativo de un escenario mensual de dispersión de ceniza en la zona de influencia del volcán Popocatépetl.

En una etapa posterior, se realizó la identificación geográfica de aeropuertos, aeródromos y helipuertos ubicados dentro de un radio de 150 millas náuticas (≈ 280 km) a partir del cráter del volcán. La información correspondiente a estas instalaciones aeronáuticas se obtuvo de fuentes oficiales publicadas por la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), organismo regulador de la aviación civil en México, en cuyo registro es obligatorio incluir todas las instalaciones de uso aeronáutico. En particular, se utilizaron el Catálogo de Aeródromos y Helipuertos de la República Mexicana y la Publicación de Información Aeronáutica (PIA) de México.

Finalmente, los mapas de probabilidad de ceniza volcánica y la base de datos georreferenciada de infraestructura aeroportuaria fueron integrados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el software QGIS. La superposición espacial de ambas capas permitió identificar las instalaciones ubicadas dentro de las zonas con mayor probabilidad de afectación por ceniza, considerando la variabilidad mensual. Este análisis facilitó la clasificación de aeródromos y helipuertos según su nivel de riesgo ante una posible erupción del volcán Popocatépetl, proporcionando una herramienta útil para la evaluación y mitigación del riesgo en la aviación civil.

3 Resultados

La distribución espacial de la nube de ceniza generada por una erupción del volcán Popocatépetl varía significativamente en función de la intensidad y la dirección de los vientos en los niveles atmosféricos donde la ceniza es depositada.

Un estudio de vientos realizado para 20 años de datos mostrado en la Figura 1, permite observar que en la altitud con mayor número de nubes de ceniza reportadas la distribución mensual de los vientos permite identificar dos patrones de dirección predominante que impactan directamente en la distribución de las nubes de ceniza y las áreas del espacio aéreo y la superficie del terreno que es alcanzado por estas partículas cuando son dispersadas.

El primer patrón de dirección de vientos se identifica durante los meses de noviembre a mayo en donde el viento proviene principalmente de la región entre el W-SW por lo que las nubes de ceniza que son emitidas en esta época del año tienen una mayor probabilidad de ser transportadas hacia la región E del país pudiendo alcanzar Estados como Veracruz, Tabasco y Tamaulipas, llegando en diversas ocasiones hasta la zona del Golfo de México.

Un segundo patrón de dirección de los vientos dominantes en la zona del Popocatepetl se presenta entre los meses de junio a octubre en donde la dirección de viento es predominantemente de la región ENE-ESE lo que ocasiona que la mayor probabilidad de dispersión de una nube de ceniza volcánica emitida en esta época del año sea dispersada en dirección WNW-WSW con dirección hacia el centro del país pudiendo llegar a grandes urbes como la Ciudad de México, Toluca y Cuernavaca.

Estas condiciones meteorológicas desempeñan un papel crucial en la extensión del área afectada, permitiendo que la nube de ceniza alcance distancias de varios cientos de kilómetros.

Como se ha demostrado en este estudio, la dispersión de ceniza no solo representa un riesgo para las aeronaves en vuelo, sino que también puede generar impactos operacionales severos en tierra, afectando aeródromos y helipuertos ubicados en las zonas de deposición. La acumulación de ceniza en pistas, plataformas y equipos de navegación compromete tanto la seguridad como la continuidad de las operaciones aeroportuarias, evidenciando la necesidad de herramientas de predicción que permitan anticipar estas afectaciones.

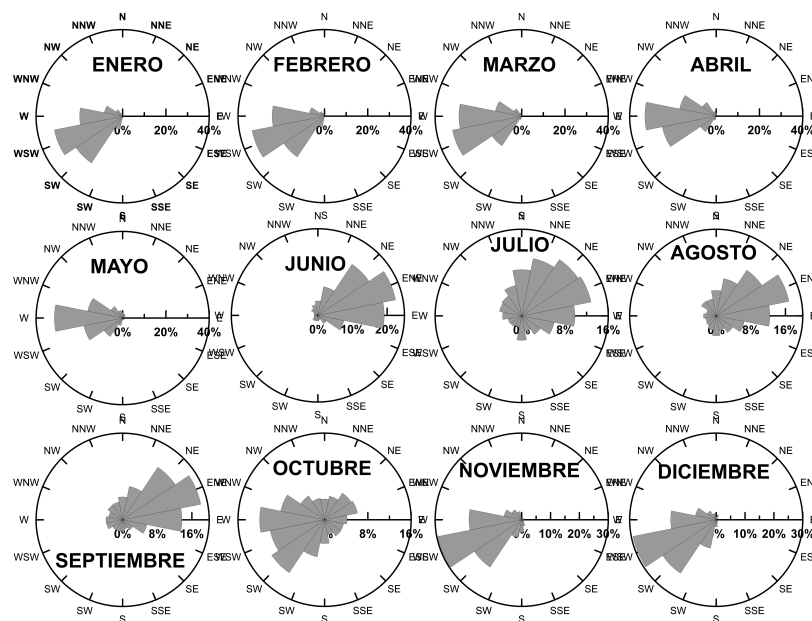


Figura 1: Estudio mensual de vientos en nivel de vuelo FL200 elaborado para un periodo de tiempo de 2004 al 2023. En el estudio se pueden identificar dos patrones de dirección, uno en los meses de noviembre a mayo con dirección del viento del W-SW y un segundo patrón en los meses junio a octubre con vientos que provienen de la región del ENE-ESE.

Generación de mapas

Los mapas de probabilidad fueron importados al entorno SIG del software QGIS y superpuestos sobre una cartografía base del territorio mexicano. A partir de ello, se identificaron los Estados con mayor frecuencia de afectación según los mapas: Veracruz, Hidalgo, Guerrero, Puebla, Ciudad de México, Estado de México, Morelos, Oaxaca, Toluca y Querétaro.

Con base en esta selección geográfica, se elaboró una nueva base de datos filtrada que incluye el nombre y las coordenadas precisas de los aeródromos y helipuertos localizados dentro de las zonas con mayor probabilidad de exposición a caída de ceniza volcánica, facilitando así el análisis espacial de riesgo.

Identificación de aeródromos y helipuertos afectados

Tomando como base los 12 mapas mensuales desarrollados por [Juárez Pérez \(2024\)](#), utilizaron para identificar los aeródromos y helipuertos ubicados dentro de las zonas con una probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica en las zonas con probabilidad igual o superior al 10%. Para ello, se superpusieron los puntos de localización geográfica de cada instalación aeronáutica sobre las áreas de probabilidad delimitadas en los mapas, utilizando un sistema de información geográfica (QGIS) para el análisis espacial como se muestra en la Figura 2 y Figura 3.

Para su análisis, los mapas se agruparon en dos conjuntos estacionales, de acuerdo con el patrón de vientos predominante a la altitud típica de dispersión de ceniza (como se muestra en la Figura 1). El primer conjunto comprende los datos evaluados y analizados de los meses de noviembre a mayo de 23 años (los mapas se muestran en la Figura 2), y para el segundo conjunto, se agrupan los meses de junio a octubre (los mapas se muestran en la Figura 3).

A partir de estos conjuntos, se elaboraron las Tablas 1 y 2, las cuales recopilan las instalaciones aeronáuticas afectadas en al menos uno de los meses, registrando su ubicación, coordenadas y nivel de probabilidad de afectación.

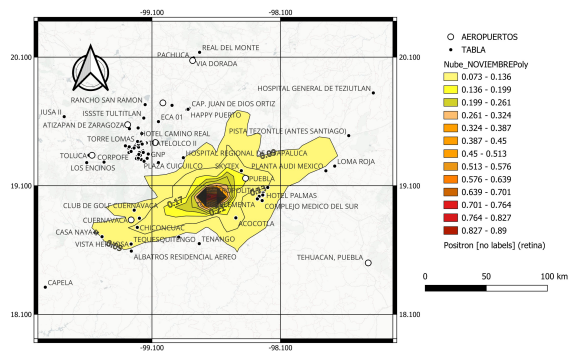
Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los 12 meses para identificar: (1) los periodos con mayor nivel de afectación y (2) las infraestructuras con mayor recurrencia de exposición a ceniza.

Este análisis permitió establecer patrones estacionales de riesgo y jerarquizar los aeródromos y helipuertos más vulnerables, lo cual representa un insumo clave para orientar acciones de mitigación y estrategias de planificación operativa en la región del volcán Popocatepetl.

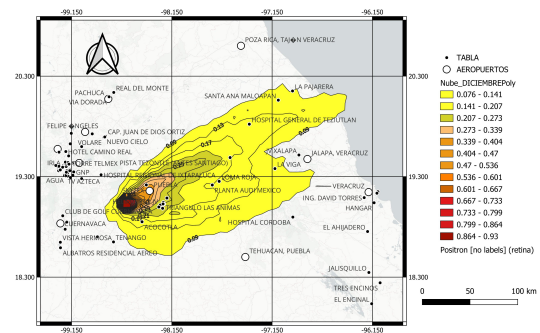
El análisis de los mapas de probabilidad correspondientes al periodo de noviembre a mayo mostró que 33 instalaciones aeronáuticas (aeródromos y helipuertos) se encuentran ubicadas dentro de zonas con al menos un 10% de probabilidad de afectación por ceniza volcánica en caso de una erupción del volcán Popocatepetl. Estas instalaciones se enlistan en la Tabla 1, ordenadas de mayor a menor en función del promedio de afectación total durante dicho periodo.

Este patrón se explica por la tendencia principal de los vientos de componente oeste (como se observa en la Figura 1), que favorecen el transporte de la ceniza hacia el este del volcán, coincidiendo con la ubicación de los Estados de Puebla, Veracruz y Morelos, donde se concentra la mayoría de las instalaciones identificadas.

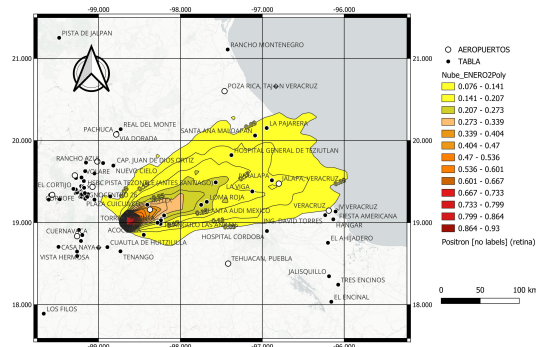
Noviembre



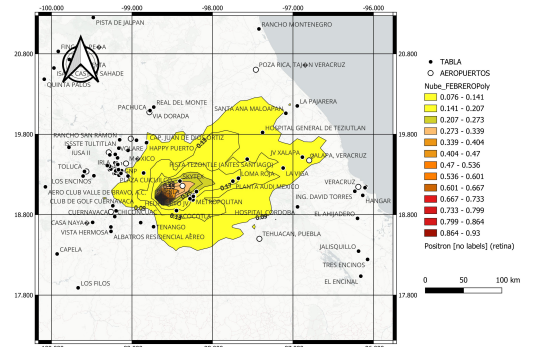
Diciembre



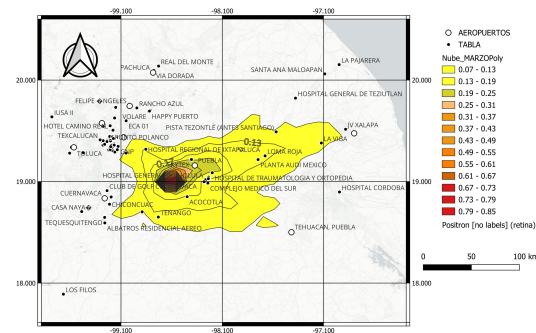
Enero



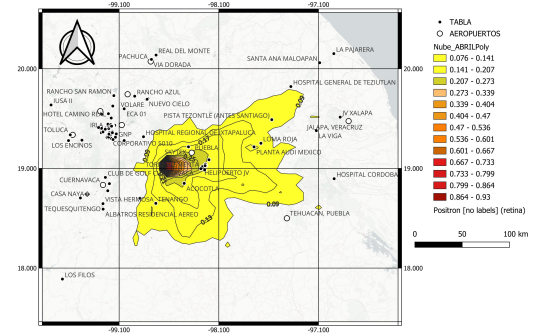
Febrero



Marzo



Abril



Mavo

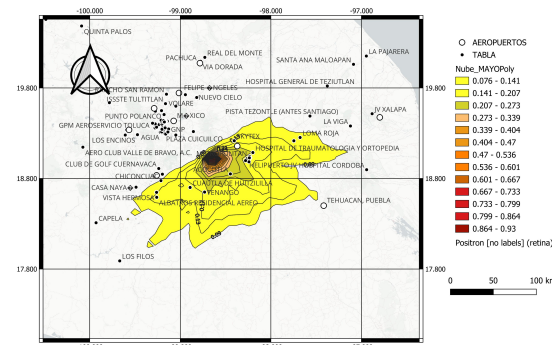


Figura 2: Mapas de probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica. Los mapas están distribuidos de forma descendente de la siguiente manera: Noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo. En los mapas se muestra la zona con una probabilidad por arriba o igual al 10% de afectación por ceniza volcánica en caso de una erupción. Se identificaron en el mapa las instalaciones aeroportuarias y helipuertos en los alrededores.

Cabe destacar que estos resultados son consistentes con el análisis estacional del viento en niveles altos de la atmósfera, el cual muestra una mayor recurrencia de transporte de ceniza hacia el noreste, este y sureste del cráter durante los meses mencionados. Esta dinámica atmosférica incrementa la exposición de la infraestructura aeroportuaria situada en esa región, justificando su clasificación como zonas prioritarias para la implementación de estrategias de mitigación del riesgo en la navegación aérea.

El análisis del segundo periodo, correspondiente a los meses de junio a octubre, mostró una distribución distinta de la ceniza volcánica en los mapas de probabilidad. En concordancia con el estudio de vientos en niveles altos, se observó que durante esta época del año la dispersión de ceniza ocurre predominantemente hacia el oeste del volcán Popocatepetl, afectando zonas densamente urbanizadas como la Ciudad de México (CDMX), su área conurbada y la ciudad de Toluca.

Esta región occidental alberga un mayor número de instalaciones aeronáuticas en comparación con la zona este del volcán, lo cual se refleja en los resultados del análisis espacial. En total, se identificaron 51 aeródromos y helipuertos ubicados dentro de áreas con una probabilidad igual o superior al 10 % de afectación por ceniza volcánica durante este periodo.

Estos hallazgos subrayan la alta vulnerabilidad operativa del espacio aéreo y terrestre en el centro del país durante los meses de verano y otoño, lo cual enfatiza la necesidad de reforzar los protocolos de monitoreo, alerta temprana y planificación de contingencias para la aviación en esta región.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de los mapas de probabilidad revelan patrones espaciales y estacionales claramente diferenciados que permiten identificar las zonas de mayor vulnerabilidad ante la dispersión de ceniza volcánica proveniente del Popocatepetl en los meses del año. La combinación de información geoespaciales basada en imágenes satelitales con modelos de dispersión atmosférica ha demostrado ser una herramienta eficaz para anticipar los posibles escenarios de afectación, tanto para aeronaves en vuelo como para instalaciones aeroportuarias en tierra.

Tabla 1: Instalaciones aeroportuarias y helipuertos que presentan una probabilidad igual o mayor al 10 % en alguno de los meses de noviembre a mayo.

Nombre	Designador	Tipo	Estado	Coordenadas		Probabilidad						
				Latitud	Longitud	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Aeropuerto de Puebla	PBC	Aeropuerto	Puebla	19.1581	-98.3715	17 %	37 %	35 %	29 %	19 %	21 %	17 %
SKYTEX	HSK	Helipuerto	Puebla	19.2171	-98.4042	13 %	29 %	27 %	27 %	17 %	17 %	13 %
Hospital de Traumatología y Ortopedia	HUN	Helipuerto	Puebla	19.0867	-98.1989	10 %	25 %	25 %	25 %	17 %	17 %	17 %
Triángulo Las Ánimas	HAQ	Helipuerto	Puebla	19.0432	-98.2342	10 %	25 %	25 %	17 %	17 %	21 %	17 %
Desarrollo Patrimonial City	HDP	Helipuerto	Puebla	19.0279	-98.2359	10 %	25 %	21 %	17 %	17 %	21 %	17 %
Hospital General de Cholula	HUP	Helipuerto	Puebla	19.0174	-98.2658	10 %	25 %	21 %	17 %	17 %	21 %	17 %
Helipuerto JV	HJV	Helipuerto	Puebla	19.0095	-98.2659	10 %	25 %	21 %	17 %	13 %	21 %	17 %
Torre Elementa	HGK	Helipuerto	Puebla	19.0432	-98.2342	10 %	21 %	21 %	17 %	13 %	21 %	17 %
Hotel Palmas	HPH	Helipuerto	Puebla	19.0272	-98.2297	10 %	21 %	21 %	17 %	17 %	17 %	17 %
Metropolitan	HYB	Helipuerto	Puebla	19.0280	-98.2375	10 %	25 %	< 10 %	17 %	17 %	21 %	17 %
Complejo Médico del Sur	HUO	Helipuerto	Puebla	18.9846	-98.2420	< 10 %	21 %	17 %	13 %	13 %	21 %	17 %
Acocotla	AOC	Aeródromo	Puebla	18.8505	-98.4470	13 %	13 %	10 %	13 %	13 %	20 %	21 %
Planta Audi México	HDU	Helipuerto	Puebla	19.2164	-97.7464	< 10 %	13 %	21 %	17 %	13 %	10 %	10 %
Pista Tezontle	TEZ	Aeródromo	Puebla	19.4897	-97.5684	< 10 %	17 %	21 %	10 %	10 %	10 %	< 10 %
Loma Roja	RLS	Aeródromo	Puebla	19.2528	-97.6774	< 10 %	13 %	< 10 %	17 %	13 %	10 %	10 %
Tenango	TNG	Aeródromo	Puebla	19.8219	-97.3769	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %	10 %	17 %
Hospital General de Teziutlán	HUQ	Helipuerto	Puebla	19.8219	-97.3769	< 10 %	13 %	13 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Santa Ana Meloapán	SAV	Aeródromo	Veracruz	20.0608	-97.0878	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
La Pajarera	LPV	Aeródromo	Veracruz	20.1523	-96.9459	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Vista Hermosa	VHA	Aeródromo	Morelos	18.6486	-99.2623	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %
Tequesquitengo	TQE	Aeródromo	Morelos	18.6467	-99.2619	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %
JV Xalapa	HJX	Helipuerto	Veracruz	19.5150	-96.8823	< 10 %	< 10 %	13 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Hospital Regional de Ixtapaluca	HIX	Helipuerto	EDOMEX	19.3182	-98.8555	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Aeropuerto Jalapa, Veracruz	JAL	Aeropuerto	Veracruz	19.4751	-96.7975	< 10 %	< 10 %	13 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Cuautla de Huitzililla	KHU	Aeródromo	Morelos	18.7009	-98.8917	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	13 %
Albatros Residencial Aéreo	ABT	Aeródromo	Morelos	18.5919	-99.2605	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	13 %
Club de Golf Cuernavaca	HCV	Helipuerto	Morelos	18.9102	-99.2379	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Hospital General de A.R. ISSSTE Morelos	HGR	Helipuerto	Morelos	18.8474	-99.1976	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Aeropuerto Cuernavaca	CVJ	Aeródromo	Morelos	18.8345	-99.2616	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Casa Nayaá	HAY	Helipuerto	CDMX	18.7039	-99.4885	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Cap. Juan de Dios Ortiz	JDO	Aeródromo	EDOMEX	19.7024	-98.8111	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Hospital General ISSSTE Tláhuac	HOT	Helipuerto	Veracruz	19.5150	-96.8823	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Chiconcuac	CHC	Aeródromo	Morelos	18.7761	-99.2139	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %

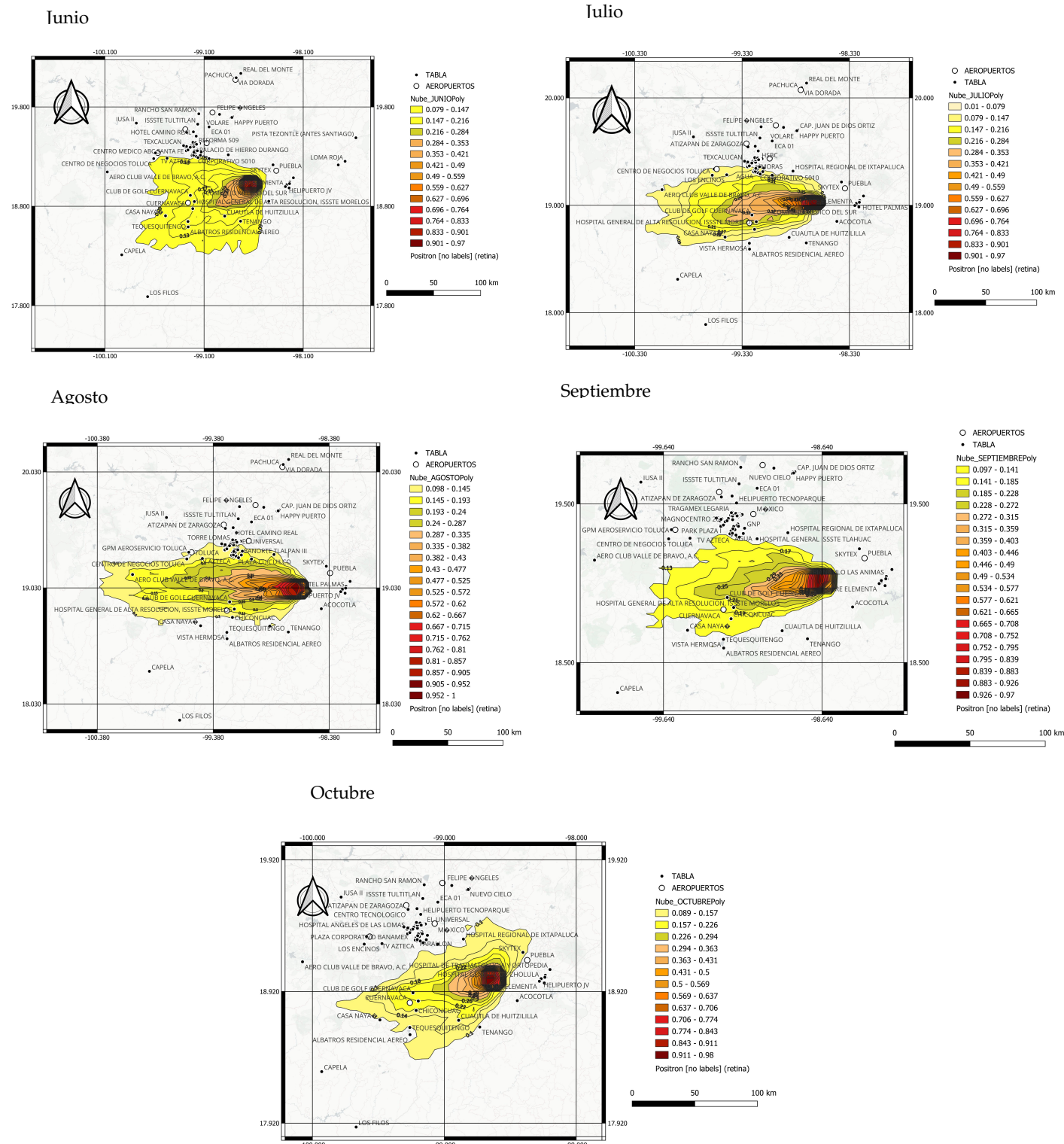


Figura 3: Mapas de probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica. Los mapas están distribuidos de forma descendente de la siguiente manera: junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En los mapas se muestra la zona con una probabilidad por arriba o igual al 10 % de afectación por ceniza volcánica en caso de una erupción. Se identificaron en el mapa las instalaciones aeroportuarias y helipuertos en los alrededores.

Tabla 2: Instalaciones aeroportuarias y helipuertos que presentan una probabilidad igual o mayor al 10 % en alguno de los meses de noviembre a mayo.

Nombre	Designador	Tipo	Estado	Coordenadas		Probabilidad				
				Latitud	Longitud	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Club de Golf Cuernavaca	HCV	Helipuerto	Morelos	18.9102	-99.2379	13 %	29 %	20 %	21 %	22 %
Hospital General de A.R. ISSSTE Morelos	HGR	Helipuerto	Morelos	18.8474	-99.1976	13 %	25 %	< 10 %	17 %	18 %
Aeropuerto Cuernavaca	CVJ	Aeródromo	Morelos	18.8345	-99.2616	13 %	25 %	< 10 %	17 %	18 %
Chiconcuac	CHC	Aeródromo	Morelos	18.7761	-99.2139	13 %	13 %	< 10 %	13 %	14 %
Hospital Dr. Manuel Gea González	HGG	Helipuerto	CDMX	19.2904	-99.1613	10 %	13 %	15 %	10 %	< 10 %
Hospital General ISSSTE Tláhuac	HOT	Helipuerto	CDMX	19.2801	-99.0494	10 %	10 %	15 %	10 %	< 10 %
Plaza Cuicuilco	HPV	Helipuerto	CDMX	19.2986	-99.1833	10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Villa Ángeles I	HOV	Helipuerto	CDMX	19.3146	-99.2056	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Agua	HGA	Helipuerto	CDMX	19.3151	-99.2056	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Corporativo 5010	HRO	Helipuerto	CDMX	19.3038	-99.1830	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
TV Azteca	HZT	Helipuerto	CDMX	19.3048	-99.2103	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Hospital Ángeles	HHH	Helipuerto	CDMX	19.3933	-99.2824	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Torre Médica Ángeles	HNT	Helipuerto	CDMX	19.3114	-99.2210	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
ITAM Santa Teresa	HIG	Helipuerto	CDMX	19.3113	-99.2234	< 10 %	13 %	10 %	10 %	< 10 %
Puebla Inversionista	HPI	Helipuerto	CDMX	19.3297	-99.2142	< 10 %	10 %	10 %	10 %	< 10 %
Farallón	HFN	Helipuerto	CDMX	19.3227	-99.2044	< 10 %	10 %	10 %	10 %	< 10 %
Casa Nayaá	HAY	Helipuerto	CDMX	18.7039	-99.4885	10 %	10 %	< 10 %	10 %	< 10 %
Cuautla de Huitzililla	KHU	Aeródromo	Morelos	18.7009	-98.8917	17 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	14 %
Vista Hermosa	VHA	Aeródromo	Morelos	18.6486	-99.2623	17 %	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %
Tequesequitengo	TQE	Aeródromo	Morelos	18.6467	-99.2619	17 %	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %
Comisión Nacional del Agua	HNF	Helipuerto	CDMX	19.3374	-99.1896	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
ITAM Río Hondo	HIH	Helipuerto	CDMX	19.3452	-99.2009	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
ITAM Naval Militar	HJN	Helipuerto	CDMX	19.3437	-99.2021	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Televisa San Ángel	HTW	Helipuerto	CDMX	19.3442	-99.2040	< 10 %	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Los Encinos	HEO	Helipuerto	EDOMEX	19.2838	-99.4730	10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Banorte Tlalpan III	HFB	Helipuerto	CDMX	19.3136	-99.1368	< 10 %	< 10 %	15 %	< 10 %	< 10 %
Aero Club Valle de Bravo, A.C.	ACJ	Aeródromo	EDOMEX	19.1457	-100.0756	< 10 %	< 10 %	15 %	< 10 %	< 10 %
Tenango	TNG	Aeródromo	Puebla	19.8219	-97.3769	13 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Atlaero Residencial Aéreo	ABT	Aeródromo	Morelos	18.5919	-99.2605	17 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Hospital Regional de Ixtapaluca	HIX	Helipuerto	EDOMEX	19.3182	-98.8555	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
GNP	HGP	Helipuerto	CDMX	19.3038	-99.1830	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Centro Médico Nacional 20 de noviembre	HBN	Helipuerto	CDMX	19.3048	-99.2103	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Moras	HMV	Helipuerto	CDMX	19.3640	-99.1761	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Centro Bancomer	HBC	Helipuerto	CDMX	19.3614	-99.1685	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Hospital San Ángel INN Universidad	HUS	Helipuerto	CDMX	19.3591	-99.1675	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Corporativo 261	HJG	Helipuerto	CDMX	19.3574	-99.1976	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Centro Corporativo Santander	HCS	Helipuerto	CDMX	19.3760	-99.2559	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Plaza Corporativo Banamex	HBA	Helipuerto	CDMX	19.3740	-99.2589	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %

Continúa en la página siguiente

Tabla 2 Instalaciones aeroportuarias y helipuertos que presentan una probabilidad igual o mayor al 10 % en alguno de los meses de noviembre a mayo (continuación)

Nombre	Designador	Tipo	Estado	Coordenadas		Probabilidad				
				Latitud	Longitud	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Copco	HFF	Helipuerto	CDMX	19.3668	-99.2622	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Park Plaza I	HPD	Helipuerto	CDMX	19.3647	-99.2595	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Torre Acuario	HTA	Helipuerto	CDMX	19.3644	-99.2609	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Corporativo Century Plaza	HBH	Helipuerto	CDMX	19.3609	-99.2677	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
World Plaza	HWP	Helipuerto	CDMX	19.3598	-99.2713	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Torre Banorte	HMB	Helipuerto	CDMX	19.3580	-99.2744	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Opción Santa Fe III	HCF	Helipuerto	CDMX	19.3578	-99.2750	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
Espacio Santa Fe	HEI	Helipuerto	CDMX	19.3630	-99.2815	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
One o One	HBJ	Helipuerto	CDMX	19.3592	-99.2791	< 10 %	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %
SKYTEX	HSK	Helipuerto	Puebla	19.2171	-98.4042	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	10 %
Centro de Negocio Toluca	HNG	Helipuerto	EDOMEX	19.2798	-99.6077	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
GPM Aeroservicio Toluca	HRG	Helipuerto	EDOMEX	19.3375	-99.5903	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Aeropuerto de Toluca	TLC	Aeropuerto	EDOMEX	19.3371	-99.5660	< 10 %	10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %

4 Discusión

Actividad eruptiva del volcán Popocatepetl

Desde el inicio de su última etapa eruptiva en noviembre de 1994, la actividad del volcán Popocatepetl se ha caracterizado por eventos de bajo impacto (VEI 1 y 2 y en ciertos casos VEI 3).

En los últimos 30 años, estos eventos explosivos frecuentemente han emitido columnas de ceniza volcánica que, combinado con la elevación del cráter (5540 msnm), alcanzan la región del espacio aéreo utilizada por la aviación civil para la navegación (Jiménez-Escalona *et al.*, 2022).

En este periodo de actividad del volcán, la VAAC de Washington ha reportado más de 4,700 eventos explosivos con emisión de ceniza volcánica, de los cuales el 78 % alcanzaron altitudes en la atmósfera entre 6,000m y 8,000m, como se muestra en la Figura 4, corresponden a los niveles de vuelo entre FL180 a FL260 utilizados por la aviación comercial para la navegación en el espacio aéreo.

Por su parte, otro impulsor del riesgo en la industria aeronáutica es el viento predominante que se encarga de transportar la ceniza depositada en la atmósfera la cual puede recorrer varias decenas de kilómetros en relativamente corto tiempo (horas). Esta ceniza transportada por el viento se va depositando sobre la superficie en la trayectoria de desplazamiento, lo que representa una amenaza para la infraestructura aeronáutica de la región alrededor del Popocatepetl.

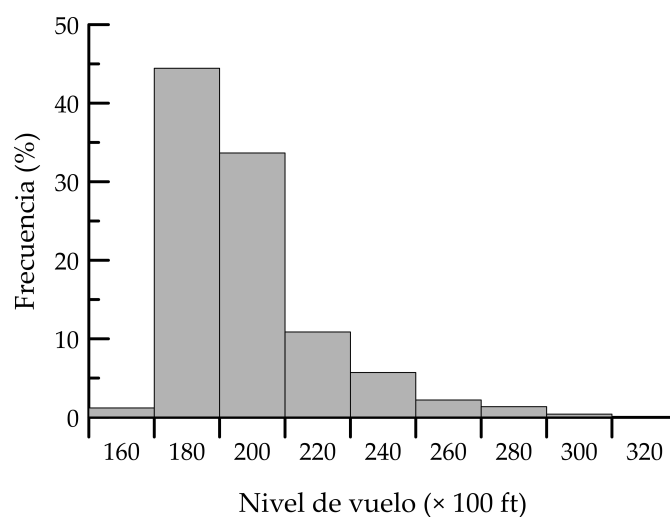


Figura 4: Histograma de altitudes de las columnas eruptivas del volcán Popocatepetl identificadas por la VAAC para las nubes de ceniza reportadas entre 1999 a 2023.

De acuerdo con los reportes de la VAAC de Washington y del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), las erupciones del volcán Popocatepetl durante el periodo analizado se caracterizaron por exhalaciones de duración variable, que oscilaron entre decenas de minutos y varias horas, liberando miles de toneladas de material particulado de distintos tamaños.

Durante este periodo, se han registrado múltiples eventos de caída de ceniza en el Aeropuerto Internacional de Puebla, así como al menos ocho incidentes que afectaron las operaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) afectando las operaciones en estos aeropuertos ocasionando cierres temporales que duran hasta que cesa la caída de ceniza y se lleven a cabo tareas para la remoción de la ceniza depositada en tierra principalmente de las instalaciones clave como son la pista, calles de rodaje y plataformas.

Si bien los actuales sistemas de monitoreo volcánico y alertas generales como las brindadas por los reportes de la VAAC de Washington y el CENAPRED en México han apoyado fuertemente la mitigación de riesgo por eventos eruptivos del volcán Popocatepetl, la integración de mapas de probabilidad de dispersión de ceniza con la ubicación de aerovías, aeródromos y helipuertos no ha sido suficientemente estudiada.

Esta falta de integración limita la capacidad de respuesta anticipada y planificación estratégica tanto para la autoridad de aviación civil como para operadores aéreos comerciales, de Estado o aviación general, así como para concesionarios y/ permisionarios de aeródromos, siendo más crítico en instalaciones de menores dimensiones sin la infraestructura adecuada para la gestión del riesgo por fenómenos naturales o que no cuenten con protocolos específicos para hacerles frente, lo que podría derivar en la consecución de algún posible desastre derivado del fenómeno *“bajo el precepto de que los desastres no son un problema de la naturaleza per se, sino más bien un problema de la relación entre lo natural y la organización y estructura de la sociedad”* (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1992).

Por esta razón, en soporte a la aviación civil se han desarrollado herramientas para la mitigación de riesgos, entre ellas, los mapas de probabilidad basados en el análisis histórico de imágenes satelitales y la combinación con el uso del modelo de dispersión HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en Ingles) de los Estados Unidos, que han dado como resultado mapas de probabilidad mensual de las zonas de afectación por transporte de la ceniza volcánica en caso de una erupción del volcán Popocatepetl (Jiménez-Escalona *et al.*, 2022; Juárez Pérez, 2024).

Con esta investigación se pretende promover con los actores encargados de salvaguardar las acciones de seguridad en las operaciones de la aviación civil, en el uso de mapas de probabilidad de afectación por la presencia y/o caída de ceniza volcánica del Popocatepetl para la mitigación de vulnerabilidades operacionales a las aeronaves en vuelo y el impacto en las instalaciones aeroportuarias. El uso de este tipo de herramientas busca promover un enfoque preventivo para atenuar cualquier tipo de contingencia y que esta sea gestionada bajo una perspectiva social fundamentada en la construcción social del riesgo de acuerdo con *“las formas en que la sociedad construye contextos vulnerables que provocan desajustes o desadaptaciones al entorno, que este se convierte en una amenaza y en un generador de riesgos”* (García Acosta, 2005).

Otros modelos de dispersión volcánica y análisis geoespacial pueden ser utilizados con los mismos fines.

A través del uso de los mapas de probabilidad de afectación por ceniza del volcán Popocatepetl creados por Juárez Pérez (2024) se puede predecir e identificar las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por la presencia de ceniza volcánica en función de la época del año, brindando la oportunidad de georreferenciar e integrar la red de aeródromos y helipuertos en la región bajo análisis.

Además, permite evaluar el nivel de exposición de cada instalación con base a la actividad histórica que ha presentado el volcán Popocatepetl en su último periodo eruptivo (1994 a la fecha), por lo que de acuerdo con La RED, sugerido en su Agenda de Investigación y Constitución Orgánica (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1992), *“La investigación debe fundamentarse en análisis causales profundamente históricos, que reconstruyan el proceso de conformación de la vulnerabilidad de la sociedad y que identifiquen los aspectos sociales que necesariamente tendrían que modificarse para avanzar en la resolución del problema”*.

Esto permitirá sugerir una clasificación de riesgo operacional con base en la afectación geoespacial considerando las variables de probabilidad e impacto, atendiendo a las hipótesis siguientes:

- Determinar cuáles son las zonas de mayor probabilidad de caída de ceniza bajo escenarios frecuentes y extremos
- Ubicar qué instalaciones aeroportuarias se encuentran dentro de las zonas de alta concentración de ceniza volcánica y en qué frecuencia
- Conocer la variación del riesgo si se consideran patrones estacionales de viento (invierno vs verano)

5 Conclusiones

Este estudio propone una metodología integral para la identificación de infraestructura aeroportuaria con alta probabilidad de ser afectada por ceniza volcánica emitida por el volcán Popocatepetl, basada en la generación y análisis de mapas de probabilidad contruidos a partir de eventos eruptivos históricos, simulaciones del modelo de dispersión HYSPLIT y procesamiento digital de imágenes satelitales MODIS. La normalización temporal de los eventos eruptivos y la estandarización de las condiciones de análisis permitieron construir escenarios representativos para cada mes del año, facilitando una evaluación estacional del riesgo en el espacio aéreo y en instalaciones en tierra.

“El proceso teórico en el que se fundamenta la gestión de seguridad: identificación de peligros, evaluación de riesgos y la posterior emisión de medidas de mitigación” (de Santis, 2024) es un modelo de gestión preventiva frente a la exposición de ceniza volcánica en operaciones aéreas y constituye una estrategia fundamental para la mitigación del riesgo y la protección de la seguridad operacional. Dicho modelo permite la identificación temprana de escenarios de amenaza, el establecimiento de medidas proactivas orientadas a la protección de tripulantes, pasajeros y aeronaves, así como la reducción de la vulnerabilidad sistémica de la infraestructura aeronáutica.

Este enfoque se encuentra alineado con los principios de gestión integral del riesgo y con los marcos de resiliencia operacional ampliamente documentados en la literatura científica y en las directrices normativas de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). En ese sentido, contribuye a fortalecer la continuidad de las operaciones aéreas al reducir la exposición innecesaria de la aviación a fenómenos naturales como la presencia de nubes de ceniza volcánica en el espacio aéreo.

Los resultados revelan que el patrón de dispersión de ceniza varía significativamente a lo largo del año, influido principalmente por la dirección y velocidad del viento en niveles de la troposfera donde es alcanzada más recurrentemente por la columna de ceniza. Se identificaron 33 instalaciones aeronáuticas en la zona ubicada al este del volcán con probabilidad de ser potencialmente afectadas entre los meses de noviembre y mayo, y 51 instalaciones aeronáuticas en la región ubicada del lado oeste del volcán entre junio y octubre con alta probabilidad de ser afectadas en caso de una erupción del volcán Popocatepetl, siendo esta última temporada la de mayor exposición debido al desplazamiento de la ceniza hacia regiones de alta densidad aeroportuaria, como la Ciudad de México y su zona metropolitana.

La adopción de mapas de probabilidad como herramienta de análisis geoespacial constituye un aporte significativo a la gestión del riesgo volcánico en la aviación civil. Esta metodología permite anticipar escenarios potenciales de afectación derivados de eventos eruptivos, optimizando la planificación estratégica de operaciones aéreas mediante el diseño de rutas alternas, la asignación eficiente de recursos y el establecimiento de protocolos de respuesta. Dichos mapas, al integrar datos probabilísticos y geoespaciales, favorecen la toma de decisiones informadas en condiciones de incertidumbre frente a eventos eruptivos.

El análisis presentado en este trabajo permitió identificar que las zonas de afectación por presencia de ceniza volcánica en caso de una erupción del volcán Popocatepetl varía significativamente a lo largo del año en función de los patrones de viento predominantes en la atmósfera libre en esta región del espacio aéreo. Durante los meses de noviembre a mayo, los vientos provenientes del oeste favorecen la dispersión de la ceniza hacia la región ubicada en el lado este del volcán, lo que expone a estados como Puebla, Veracruz y Morelos.

Por el contrario, en el periodo de junio a octubre, los vientos provenientes del este dispersan la ceniza hacia la región del lado oeste del volcán, impactando áreas densamente urbanizadas como la Ciudad de México y Toluca, donde se concentra un mayor número de instalaciones aeronáuticas. Esta variabilidad estacional resalta la importancia de incorporar el componente temporal en la gestión del riesgo en caso de una erupción del volcán Popocatepetl.

Asimismo, los mapas de probabilidad, al ser construidos a partir de más de 4,700 eventos eruptivos históricos reportados en 23 años de actividad del volcán Popocatepetl, ofrecen una perspectiva estadísticamente robusta sobre la recurrencia y la extensión de las zonas potencialmente afectadas. Esta evidencia permite establecer una jerarquización de la infraestructura aeroportuaria en función de su nivel de exposición, lo cual resulta crucial para orientar acciones de mitigación diferenciadas y proporcionales al nivel de riesgo.

Cabe destacar que, si bien los mapas generados representan una herramienta predictiva valiosa, su efectividad en la mitigación del riesgo dependerá de su integración en los protocolos de operación y respuesta tanto de autoridades aeronáuticas como de operadores aeroportuarios. Actualmente, muchas instalaciones carecen de mecanismos específicos para actuar ante la amenaza de ceniza volcánica, particularmente aquellas de menor escala que no cuentan con capacidad técnica ni logística para la gestión de este tipo de eventos.

Por lo tanto, se propone que estos mapas sean utilizados como insumo para la formulación de planes de contingencia, la asignación de recursos de limpieza y mantenimiento, el rediseño de rutas aéreas alternas y la toma de decisiones operativas en tiempo real. Además, su implementación contribuiría al fortalecimiento del enfoque preventivo en la aviación civil, alineado con las recomendaciones internacionales sobre la gestión del riesgo volcánico.

Finalmente, esta investigación confirma la utilidad del enfoque probabilístico y geoespacial en la evaluación del riesgo por ceniza volcánica y abre la puerta a su aplicación en otros escenarios de riesgo natural que afectan la seguridad operacional en la aviación. La replicabilidad de esta metodología podría beneficiar a otras regiones volcánicamente activas con alta densidad de tráfico aéreo y limitada capacidad de respuesta.

Se recomienda incorporar estos mapas en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones de las autoridades aeronáuticas y de protección civil, especialmente en aeródromos de menor escala que actualmente no cuentan con capacidades adecuadas para responder a eventos de ceniza volcánica gestionado bajo una perspectiva social dado que *“las formas en que la sociedad construye contextos vulnerables que provocan desajustes o desadaptaciones al entorno, que este se convierte en una amenaza y en un generador de riesgos”* (García Acosta, 2005).

Se plantea que futuras investigaciones integren datos en tiempo real, modelos meteorológicos dinámicos y sensores satelitales de alta resolución espacial y temporal con el propósito de optimizar los modelos de predicción de dispersión de ceniza volcánica. Esta integración tecnológica permitiría mejorar la precisión

de los modelos predictivos y, en consecuencia, fortalecer la capacidad de respuesta ante emergencias volcánicas que impactan el espacio aéreo nacional. Tales avances contribuirían a una gestión del riesgo más robusta, alineada con los enfoques contemporáneos de ciencia de datos y observación volcánica aplicados a la seguridad operacional de la aviación civil.

6 Referencias

- Arreeras, S. y Arimura, M. (2022). An improvement on shelter airport selection model during large-scale volcanic disasters: A case study of Hakoneyama Japan. *Asian Transport Studies*, 8:100054. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2021.100054>.
- Aydar, E., Çubukçu, H. E., Bal, Ç., Cluzel, N., Aladağ, Ç. H., Ersoy, O., y Laporte, D. (2024). Volcanic jets to commercial jets: synopsis and diagnosis. *Bulletin of Volcanology*, 86(71). <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01759-z>.
- Bolić, T. y Žarko Sivčev (2011). Eruption of eyjafjallajökull in iceland: Experience of european air traffic management. *Transportation Research Record*, 2214(1):136–143. <https://doi.org/10.3141/2214-17>.
- Casadevall, T. J. (1994). The 1989–1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1):301–316. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90038-8).
- de Leeuw, J., Schmidt, A., Witham, C. S., Theys, N., Taylor, I. A., Grainger, R. G., Pope, R. J., Haywood, J., Osborne, M., y Kristiansen, N. I. (2021). The 2019 raikoke volcanic eruption – part 1: Dispersion model simulations and satellite retrievals of volcanic sulfur dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(14):10851–10879. <https://doi.org/10.5194/acp-21-10851-2021>.
- de Santis, A. (2024). *Deficiencias de seguridad en el transporte aéreo y su relación con la ciencia*. MTAero. ISBN: 9798396520219.
- Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J.-C., y Gonzalez, R. (2016). Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3):675–704. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-675-2016>.
- García Acosta, V. (2005). El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos. *Desacatos*, 19:11–24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1607-050X2005000300002&lng=es&tlng=es.
- Guffanti, M., Casadevall, T. J., y Budding, K. (2010). Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: A compilation of known incidents, 1953–2009. Technical report. U.S. Geological Survey Data Series 545, ver. 1.0, 12 p., <https://pubs.usgs.gov/ds/545>.
- Jiménez-Escalona, J. C., Poom-Medina, J. L., Roberge, J., Aparicio-García, R. S., Avila-Razo, J. E., Huerta-Chávez, O. M., y Da Silva, R. F. (2022). Recognition of the Airspace Affected by the Presence of Volcanic Ash from Popocatepetl Volcano Using Historical Satellite Images. *Aerospace*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/aerospace9060308>.
- Juárez Pérez, C. (2024). Elaboración de mapas de probabilidad para la mitigación de riesgos en la aviación debido a nubes de ceniza volcánica. [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.

Major, J. y Lara, L. (2013). Overview of Chaitén Volcano, Chile and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40(2):196–215. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a01>.

Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (1992). Agenda de investigación y constitución orgánica. <https://www.desenredando.org/public/libros/1992/agenda/AgendaDeInvestigacion-1.0.0.pdf>.

Reichardt, U., Ulfarsson, G. F., y Pétursdóttir, G. (2019). Developing scenarios to explore impacts and weaknesses in aviation response exercises for volcanic ash eruptions in Europe. *Journal of Air Transport Management*, 79:101684. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101684>.

Romero, J., Mella, M., Swanson, F., Crisafulli, C., González, M., Lara, A., Morgavi, D., Arzilli, F., Clavero, J., y Reckziegel, F. (2017). La erupción del volcán Calbuco en 2015: Volcanología, sociedad y ecosistemas. *Centro de Investigación y Divulgación de Volcanes de Chile*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27443.02086>.

Takebayashi, M., Onishi, M., e Iguchi, M. (2021). Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of japan. *Journal of Air Transport Management*, 97:102136. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102136>.