

Tlamati Sabiduría



Análisis de las fuertes tormentas eléctricas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y su vecindad (1990-2022)

Lemay Entenza-Tilman^{1*}
José Francisco León-Cruz²
Naxhelli Ruiz-Rivera³

¹Posgrado de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Del. Coyoacán, CDMX, Ciudad de México, México.

²Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Del. Coyoacán, CDMX, Ciudad de México, México.

³Departamento de Geografía Social, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Del. Coyoacán, CDMX, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia
lemay081976@gmail.com

Resumen

Las fuertes tormentas eléctricas son uno de los peligros convectivos más comunes que ocurren en los aeropuertos. Debido a las características que estos fenómenos naturales tienen, se les ha asociado con un alto potencial de peligrosidad para la aviación. En este trabajo se analizan, desde un enfoque estadístico descriptivo, empleando diferentes fuentes de información como las observaciones meteorológicas aeronáuticas e imágenes de satélite meteorológico. A su vez, se realiza una descripción de las variables meteorológicas que conforman la observación del peligro. Los resultados muestran que el promedio anual de días que se presenta el peligro supera los 71; situación que dificulta o, inclusive, puede llegar a impedir que las aeronaves realicen los procedimientos de aterrizaje y despegue, ocasionando demoras y/o cancelaciones de los vuelos. El peligro en la zona de estudio persiste con una tendencia típica de la estacionalidad, es decir, son frecuentes en los meses de verano que coinciden con la temporada ciclónica

Información del Artículo

Cómo citar el artículo:

Entenza-Tilman, L., León-Cruz, J.F., Ruiz-Rivera, N. (2024). Análisis de las fuertes tormentas eléctricas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y su vecindad (1990-2022). *Tlamati Sabiduría*, 18, 54-68.

Editores Invitados: Dra. Rosalva Pérez-Gutiérrez, Dr. Oscar Frausto-Martínez, Dr. Julio Cesar Morales-Hernández.



del país. Además, contribuye con el análisis de los posibles impactos negativos que tienen las variables ambientales como la cizalladura del viento en los procedimientos de aterrizaje y despegue.

Palabras clave: Peligro, Tormentas eléctricas, Espacio aéreo.

Abstract

Severe thunderstorms are one of the most common convective hazards at airports. Due to the characteristics of these natural phenomena, they have been associated with a high hazard potential for aviation. This paper analyzes, from a descriptive statistical approach, using different sources of information, the aeronautical meteorological observations in the period 1990-2022. At the same time, a description of the meteorological variables that make up the hazard observation is made. The results show that the annual average number of days this convective hazard is present exceeds 71, making it difficult or even preventing aircraft from performing landing and takeoff procedures, causing flight delays or cancellations. The threat in the study area persists with a typical seasonal tendency, i.e., they are frequent in the summer months that coincide with the country's cyclonic season. In addition, it contributes to the analysis of the possible negative impacts of environmental variables such as wind shear on landing and takeoff procedures.

Keywords: Threat, Thunderstorms, Airspace.

Introducción

Estudios previos ([Vidal-Zepeda, 2007](#); [León-Cruz et al., 2023](#)) indican que la distribución estacional de las tormentas eléctricas en México, ocurren desde finales de primavera (mayo) hasta inicios del otoño (octubre), principalmente durante la tarde y noche. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se localiza en una zona donde ocurren estas tormentas eléctricas. El AICM forma parte de un componente de desarrollo urbano que no está exento de este peligro convectivo.

Según la Aviation Safety Network ([ASN](#), por sus siglas en inglés), de 1990 a 2022 han ocurrido 173 accidentes aéreos en México que es el registro más riguroso, público y desglosado sobre el tema. Las pérdidas humanas (pasajeros y tripulantes) por estos accidentes asciende a 199. El 66% de estos accidentes ocurrió por situaciones técnicas operacionales mientras que el 34% se asociaron a condiciones meteorológicas adversas y sucesos climáticos violentos, atendiendo a la clasificación del peligro natural por la Organización de la Aviación Civil Internacional ([OACI, 2018](#)).

Los fenómenos meteorológicos severos que se desarrollan localmente en un corto período de tiempo son uno de los principales riesgos para la seguridad de la aviación ([Solazzo et al., 2020](#)). [Gultepe et al. \(2019\)](#) mencionan que el estudio de las tormentas eléctricas, para la aviación, son un componente importante de operación del sistema de transporte aéreo durante el procedimiento de aterrizaje y despegue de un vuelo, incluyendo información relevante como la cizalladura del viento con ráfagas descendentes o microrráfagas.

La manifestación de fenómenos severos en el tiempo meteorológico, como tornados, granizos y vientos lineales de alta velocidad con potencial destructivo, se encuentra intrínsecamente ligada a modificaciones significativas en la estructura de las tormentas. En línea con esta noción, [García et al. \(2007\)](#) señalan que las tormentas que logran alcanzar este nivel de intensidad son catalogadas como eventos excepcionales y comúnmente son identificadas como tormentas eléctricas locales severas (TELS). Desde esta perspectiva, [Pamplona y Pinto-Alves \(2020\)](#) destacan que el análisis de registros históricos correspondientes a tales fenómenos brinda la oportunidad de

desarrollar modelos que permitan estimar la probabilidad de ocurrencia de accidentes aéreos. En resumen, es necesaria mayor investigación para caracterizar las condiciones de vuelo de las aeronaves, las operaciones en el aeródromo y los entornos terrestres, por lo que la meteorología aeronáutica requiere de nuevas plataformas instrumentales y técnicas de análisis para mejorar las condiciones de seguridad de los entornos de vuelo (Gultepe y Feltz., 2019). En este contexto, la presente investigación analiza el peligro por fuertes tormentas eléctricas en el AICM y zonas vecinas. El trabajo se centró en generar una estadística descriptiva, cuyos resultados se emplearon para identificar y caracterizar estos peligros convectivos en el contexto aeronáutico mexicano.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se localiza en los 19° 26' 09.4860" N y - 99° 04' 24.2145" O entre pistas 05L/23R y 05R/23L (AIP, 2021). La dirección y distancia desde el centro histórico de la ciudad es de 6.3 km, y se ubica a una elevación de 2,224 msnm (7,297 pies). Su área de aproximación se caracteriza por limitar con un sistema montañoso desde el noreste y en dirección hacia el sureste, sur, suroeste y oeste con alturas que oscilan entre los 1,500 a 5,900 msnm, aproximadamente (Fig. 1).

El área de estudio delimita las fases de vuelo para el sector de la aviación, para el caso que nos ocupa, área de aproximación final. Esta incluye los procedimientos de aterrizaje y despegue sobre un área urbanizada para las cabeceras de la pista 05 derecha e izquierda, que forma parte de un componente urbano. El criterio cartográfico, sobre la base de las observaciones meteorológicas aeronáuticas, incluye la distancia límite para observar el peligro en la vecindad del aeropuerto. En este sentido, el Manual Meteorológico del Observador para el Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM, 2019), notifica que es de 8 a 10 millas náuticas (14.81 km y 18.52 km, respectivamente) de radio desde el centro del aeropuerto o del lugar que se realice la observación.

Contexto aeronáutico

La OMM (1992) define a una tormenta como descargas eléctricas repentinas que se manifiestan por un destello de luz (relámpago) y un sonido agudo o retumbante (trueno). Las tormentas eléctricas están asociadas con nubes convectivas (Cumulonimbus) y, con mayor frecuencia, van acompañadas de precipitaciones en forma de lluvias o granizo, u ocasionalmente nieve, bolitas de nieve o bolitas de hielo.

Es importante notar que diversos autores (e.g., Solazzo *et al.*, 2020; Baleriola y Ledesma, 2007) consideran a las tormentas como un fenómeno espectacular de la naturaleza del tiempo severo que se desarrollan localmente en un corto período de tiempo, y que a su vez son uno de los principales riesgos para la seguridad de la aviación.

Las operaciones aéreas implican el análisis de datos in situ, ya que, en la actualidad, los modelos de pronóstico numérico típicos carecen de resolución espacial y temporal para representar adecuadamente las escalas de las aeronaves (10-100 m) en la estimación de procesos aerodinámicos y micro físicos (Gultepe y Feltz, 2019). Por lo tanto, uno de los mayores aportes de esta investigación radica en el análisis estadístico descriptivo de los datos observados para aproximarse a la caracterización de las condiciones de las rutas aéreas de aproximación y despegue de las aeronaves en el entorno urbano donde se desarrollan.

Para esta investigación se utilizaron los datos del Meteorological Aerodrome Report (METAR) y el Special Report of Meteorological Conditions (SPECI), de la estación MMMX (correspondiente al AICM), obtenidos desde el sitio electrónico de la Universidad del Estado de Iowa, para el periodo 1990-2022. El METAR es un reporte meteorológico emitido de forma horaria en un aeródromo y se emplea por el personal técnico aeronáutico para conocer las condiciones meteorológicas dentro del aeropuerto (y su vecindad), con el fin de garantizar la seguridad en las operaciones aéreas. El SPECI se difunde en

Datos y metodología

Para esta investigación se utilizaron los datos del Meteorological Aerodrome Report (METAR) y el Special Report of Meteorological Conditions

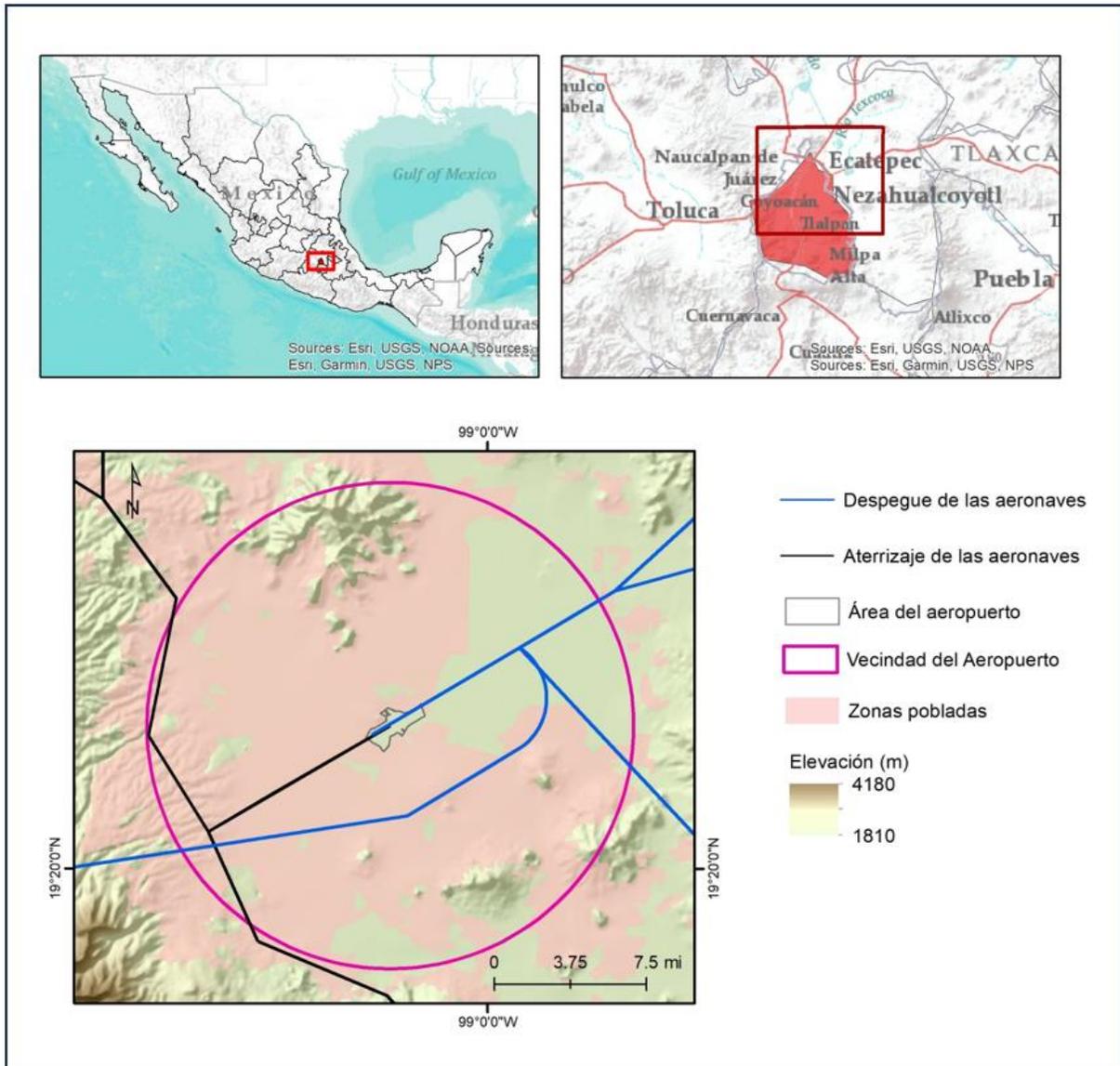


Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia sobre la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y los procedimientos de aproximación por las cartas aeronáuticas. Sistema de coordenadas: WGS_1984_UTM_Zone_14N Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM). Datum: WGS1984.

(SPECI), de la estación MMMX (correspondiente al AICM), obtenidos desde el sitio electrónico de la Universidad del Estado de Iowa, para el periodo 1990-2022. El METAR es un reporte meteorológico emitido de forma horaria en un aeródromo y se emplea por el personal técnico aeronáutico para conocer las condiciones meteorológicas dentro del aeropuerto (y su vecindad), con el fin de garantizar la seguridad en las operaciones aéreas. El SPECI se

difunde en cualquier momento siempre y cuando cumpla con los requisitos emitido por el Anexo 3 del convenio de aviación civil internacional.

Los datos se integraron en tablas de formato Excel y se realizó una selección de los códigos meteorológicos aeronáuticos que describen las fuertes tormentas, así como granizos. Los reportes se filtraron con los códigos aeronáuticos: +TSRA (fuerte tormenta eléctrica con lluvia), +TSRAGS (fuerte tormenta eléctrica con lluvia y granizo

pequeño diámetro de hasta 5mm), +TSRAGR (fuerte tormenta eléctrica con lluvia y granizo con un diámetro que varía entre 5 y 50mm), SQ (Fuertes vientos que surgen de repente y dura en general al menos un minuto) y VCTSRA (tormenta eléctrica en la vecindad del aeródromo con un radio de 10 millas náuticas). El objetivo final de este proceso fue generar una climatología de las tormentas en el AICM y zonas vecinas.

Para conocer los cambios en el espacio geográfico, una de las herramientas actuales e imprescindibles son las imágenes de los sensores remotos, dado que ofrecen instantáneas de gran calidad y a bajos costos, teniendo en cuenta la superficie que puede ser evaluada simultáneamente. En tal sentido, se utilizaron los datos georreferenciados del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT; <https://www.lanot.unam.mx/>) del [Lightning Research at the Global Hydrometeorology Resource Center Distributed Active Archive Center \(GHRC DAAC\)](#) en el Geostationary Lightning Mapper (GLM, por sus siglas en inglés) colocado en el satélite GOES-16. Esto permitió elaborar un mapa de distribución espacial de la densidad de rayos en la vecindad del AICM para el periodo 2018 – 2022. Los datos del GLM proporcionaron una medida cuantitativa de la calidad del resultado de las observaciones in situ, lo que permitió la comparación con la fuente de información primaria. Además, sirvió para validar las observaciones de la estación meteorológica del aeropuerto.

Parámetros analizados

Los radiosondeos son una de las fuentes de información más utilizadas para analizar los indicadores convectivos, y son comúnmente utilizados en la predicción operativa de tormentas severas (León *et al.*, 2023). Estudios previos han empleado gran variedad de índices y parámetros de inestabilidad, cinemáticos y compuestos para caracterizar los entornos convectivos asociados a fenómenos meteorológicos extremos como tormentas, granizadas e incluso tornados (Rodríguez y Bech, 2021; Taszarek *et al.*, 2020, 2021; Zhou *et al.*, 2021). En este sentido, es importante notar que el territorio mexicano cuenta, hasta la fecha, con una red de 15 estaciones de radiosondeos.

Para esta investigación se descargaron los datos de la estación de radio-sondeo No. 76680 (localizada en la latitud 19° 24' 13.3308" N y longitud -99° 11' 48.03" O). Su cercanía al aeropuerto es de aproximadamente 15 km y su localización la ubica en una de las rutas aéreas de aproximación de aterrizaje y despegue del aeródromo. Para el periodo comprendido entre 1990-2022 se recuperaron un total de 603 radio sondeos, a los que se aplicó un filtro de calidad basado en una inspección manual. Este proceso consistió en la verificación de los datos en los diferentes niveles de presión. Se descartaron aquellos sondeos que no contaban con información en al menos 10 niveles de presión, asimismo, si presentaban valores anormales en las diferentes variables (p. ej., valores de humedad relativa por encima de 100 o valores en la dirección del viento superiores a 360).

Dicho análisis dio como resultado que se integraran únicamente 81 radiosondeos a las 1200UTC (06:00 hora local) y 35 a las 1800UTC (12:00 hora local). Asimismo, se eliminaron 22 observaciones de la 1200UTC en los días que también se reportaron a las 1800 UTC. Finalmente, se extrajeron los índices que a continuación se listan:

CAPE: Energía convectiva potencial disponible. Parámetro comúnmente utilizado para discriminar la severidad de las tormentas (Blamey *et al.*, 2017) y caracterizar las tormentas convectivas severas (Brown y Jackson, 2009; Dupilka y Reuter, 2011). Se basa en las diferencias de temperaturas entre la temperatura virtual de la parcela, y la temperatura virtual del ambiente. Se toma el criterio de los valores medios del CAPE (Calvo, 2021) para determinar si las tormentas son unicelulares, o multicelulares.

Cizalladura del viento: La cizalladura del viento (en inglés wind shear) se define como un cambio en el viento, ya sea en dirección o velocidad o en ambos, sobre una corta distancia (Baleriola y Ledesma, 2007). En tal sentido se utiliza la cizalladura del viento a granel entre superficie (WS, por sus siglas en inglés) hasta: 1km (donde valores por encima de 10 m/s propician la formación de tornados (Groenemeijer *et al.*, 2021), de 2 y 3 km (altura donde se realizan los procedimientos de aproximación de las

aeronaves), para 6 km (primordial en la organización de los sistemas convectivos, es un discriminante para la predicción de ambientes de granizo y rachas de viento no severas, severas y extremadamente severas), y finalmente 8 km (empleado para estimar la duración de superceldas).

Cizalladura de la capa efectiva: También llamado *Effective Bulk Wind-shear* (EBWD, por sus siglas en inglés) se calcula como la diferencia entre la velocidad del viento en la capa inferior del flujo de entrada y la altura media entre el flujo de entrada y el nivel de equilibrio, permite predecir y diagnosticar el tipo de convección.

Variables meteorológicas que definen intensidad y los efectos a las aeronaves

Además, de los índices obtenidos por los radiosondeos, se analizaron las variables de las observaciones meteorológicas aeronáuticas: dirección del viento perpendicular a la pista y su intensidad; las rachas vinculadas con este tipo de viento; la visibilidad; el tipo de nube y la altura de la base de la nube.

Visibilidad: Con propósitos aeronáuticos, se define como la máxima distancia a la cual un objeto de dimensiones adecuadas situado cerca del suelo puede ser visto y reconocido cuando lo observamos contra un fondo brillante y la máxima distancia a la cual en la vecindad la luz de 1000 candelas puede ser vista e identificada contra un fondo brillante (SENEAM, 2019).

Nubosidad: Las condiciones de vuelo correspondiente a las diversas coberturas nubosas son importantes para conocer el peligro a que se pueden encontrar las aeronaves en las diferentes fases de vuelo. El SENEAM (2019) la define como una acumulación visible de gotas de agua de tamaño minúsculo o partículas de hielo en la atmósfera. La altura de la base de la capa más baja de nube que se encuentra sobre la tierra o el agua y cubre más de la mitad del cielo y se encuentra debajo de 6,000 m (20000 pies).

Dirección del viento perpendicular a la pista: Aunque no existe una definición precisa sobre su conceptualización en los documentos normativos de la OACI, como el Anexo 3, se considera a

aquel componente que sopla perpendicularmente a la pista de aterrizaje dificultando los aterrizajes y despegues porque es lo suficientemente fuerte y puede provocar daños estructurales a la aeronave. El Servicio a la Navegación Aérea en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) no define la componente cruzada de la variable en sus documentos normativos; no obstante, atendiendo a las direcciones de las pistas, explicadas en el AIP (2020) se define que para la pista 05 (RWY05) y la pista 23 (RWY23) la componente cruzada oscila entre los ángulos de 130 a 150 grados y los 310 a 330 grados.

Resultados y discusión

Distribución temporal

Entre 1990 y 2022 en el aeropuerto se reportaron 9,419 tormentas eléctricas, de las cuales 480 corresponden a las fuertes tormentas, tendiendo al código de observación meteorológico aeronáutico definido por (SENEAM, 2019) y 1,065 a tormentas en la vecindad del aeropuerto. El resto de los eventos se clasifican como débiles y moderados. El promedio anual de días en los que se presentan supera los 71, lo que dificulta, o en ocasiones impide, que las aeronaves realicen los procedimientos de aterrizaje y despegue ocasionando demoras y/o cancelaciones a los pasajeros. Se estima que alrededor de un cuarto de los retrasos en vuelos en el año 2021 (16,402 casos) tuvieron que ver con las condiciones meteorológicas (El Universal, 2022).

La identificación del peligro por fuertes tormentas eléctricas del período 1990-2022, desde un análisis estadístico descriptivo, arrojó como resultado que el año de mayor actividad fue 2014 con 44 eventos, y los de menor actividad fueron 1991, 1993, 1995 y 1999 con un solo evento (Fig. 2).

El mes con mayor número de tormentas es septiembre, con un 19.4%, y el menor número se registra en el mes invernal de enero con un 0.2%, como lo representa la Figura 2. La estacionalidad de este peligro es similar con los resultados de la climatología de las tormentas eléctricas locales severas (TELS) en la Zona Metropolitana de Guadalajara (García et al., 2007). El mes de diciembre no reporta este tipo de peligro en el aeropuerto, aunque sí existen reportes de otros tipos de tormentas como las débiles y moderadas,

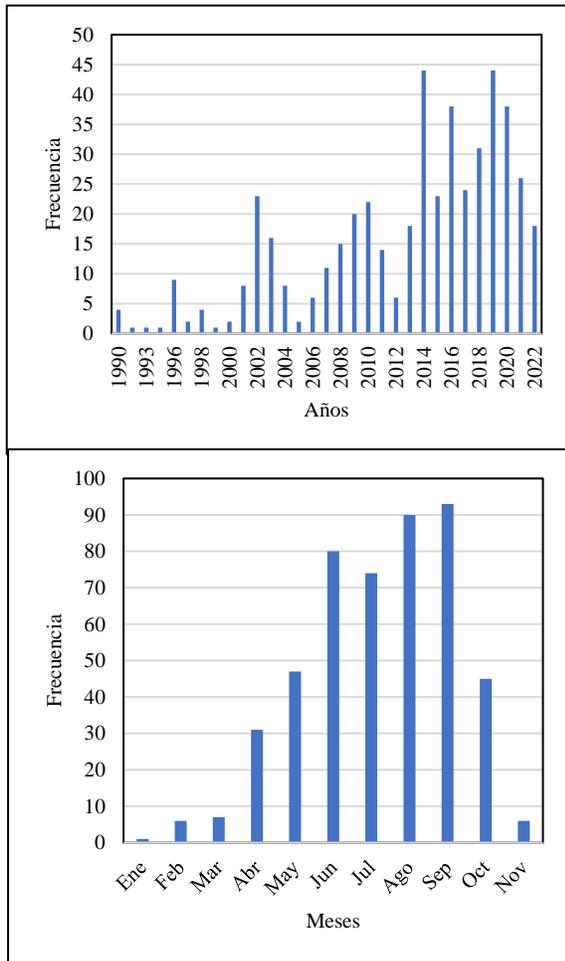


Figura 2. Distribución anual y distribución mensual de las fuertes tormentas eléctricas en el AICM durante el periodo de 1990 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

teniendo en cuenta el criterio de intensidad que se utiliza para el contexto aeronáutico.

Los resultados muestran que el peligro persiste con una tendencia típica de la estacionalidad, es decir, que los meses donde más se reportan son de mayo a octubre y corresponden con el periodo de lluvias por sistemas meteorológicos que se documentan a lo largo del territorio mexicano, como ondas tropicales, ciclones o incluso, frentes fríos tardíos. Además, contribuyen con el análisis de los posibles impactos negativos que tienen las variables ambientales en los procedimientos de aterrizaje y despegue.

Las horas con más frecuencia del fuerte peligro por tormentas eléctricas es entre la 0300 hasta las 0500 UTC (21:00 a 23:00 hora local) con un 56% de representatividad, disminuyendo desde las 0700 UTC hasta las 0200 UTC (01:00 a 23:00 hora local) con el 27%. Desde las 0800UTC (02:00 hora local) hasta las 0100 UTC (19:00 hora local) se reportan el 17% de este peligro. No se han registrado tormentas de este nivel en horarios de las 1400 UTC (08:00 hora local) y desde las 1700 UTC hasta las 1900 UTC (11:00 a 13:00 hora local) como se observa en la Figura 3. La mayor actividad del peligro coincide con horarios de mayores operaciones aéreas de aterrizaje y despegue.

Durante el periodo analizado, se observa que las fuertes tormentas representan un riesgo con una frecuencia más alta de duración de 11 a 20 minutos, seguidas por las que duran de 1 a 10 minutos como se muestra en la Figura 4. Es importante destacar que las tormentas que tienen una duración de 30 minutos o más, son poco comunes. No existe reporte alguno con una duración mayor a 2 horas. Los resultados son

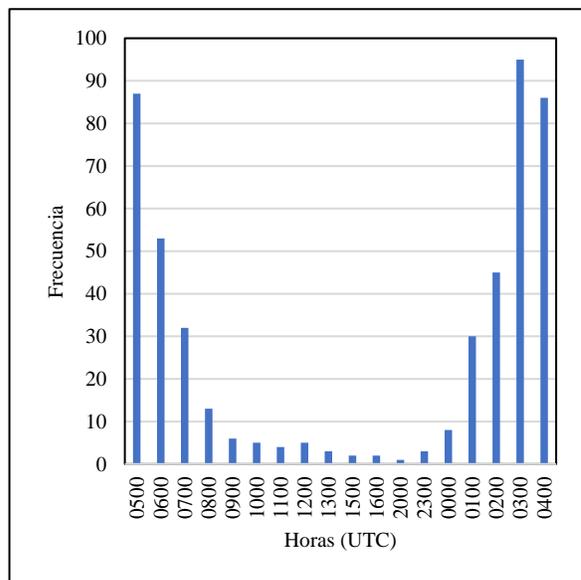


Figura 3. Distribución horaria de las fuertes tormentas eléctricas en el AICM durante el periodo de 1990 a 2022. Fuente: Elaboración propia con información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa.

<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

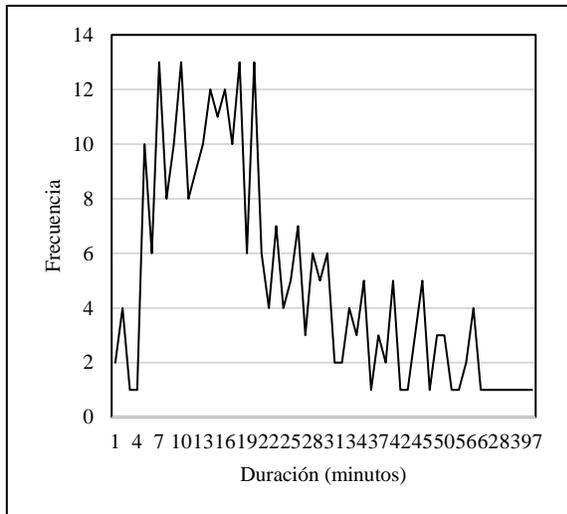


Figura 4. Duración de las fuertes tormentas eléctricas en el AICM durante el periodo de 1990 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa.
<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

coincidentes con aquellos mostrados por la escala de Ted Fujita (Wilson y Wakimoto, 2001) para la meso escala, sus categorías (alfa, beta y gamma) y algunos fenómenos meso-escalares asociados, citados por Wilson y Wakimoto (2001), donde las tormentas, al ser fenómenos de la escala meso-gama, su tiempo de ocurrencia oscila entre las 3 horas hasta 30 minutos, con dimensiones espaciales de 2 a 20 km.

Adicionalmente, se calcularon las tendencias de los reportes recopilados para las tormentas en el AICM. En este sentido, en los meses de mayo a octubre existe una tendencia al aumento de las fuertes tormentas eléctricas con lluvias en el aeródromo con un p-valor <0.05. Para el resto de los meses la tendencia a disminuir es observable.

A bajas altitudes, la aeronave es especialmente vulnerable porque hay poco tiempo o espacio para recuperarse. Por lo que evitar las tormentas eléctricas es la maniobra más segura que el piloto puede ejecutar (Zrníc et al., 1987). Los resultados del peligro de tormentas eléctricas observadas en la vecindad del aeropuerto (que corresponden con información para los procedimientos de aterrizaje

Mes	z	p-valor
Enero	1.5093	0.1312
Febrero	1.3975	0.1623
Marzo	0.41111	0.681
Abril	2.3802	0.0173
Mayo	1.8579	0.06318
Junio	4.0257	5.68E-05
Julio	3.9528	7.73E-05
Agosto	3.6933	0.0002213
Septiembre	2.9455	0.003224
Octubre	2.8629	0.004198
Noviembre	1.9403	0.05234

Tabla 1. Tendencias mensuales de las tormentas eléctricas para el periodo 1990-2022. Fuente: Elaboración propia con información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa.
<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

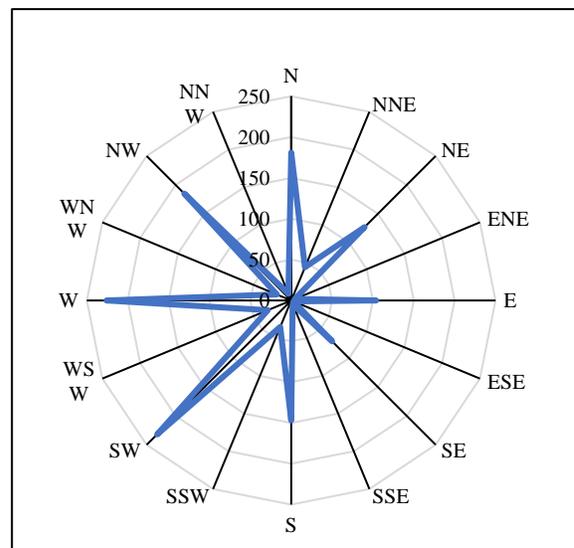


Figura 5. Referencia geográfica de la frecuencia de tormentas eléctricas en el AICM durante el periodo de 1990 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa.
<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

y despegue), muestran que la mayor cantidad de estas se reportan al suroeste, oeste y noroeste (Fig. 5). Teniendo en consideración que las pistas 05 derecha e izquierda se orientan aproximadamente en ese sentido.

Los resultados de la localización de las tormentas en la vecindad también son coincidentes con la densidad de rayos para el periodo 2018-2022 (Fig. 6). He *et al.*, (2022) mencionan que los rayos representan una grave amenaza para el Sistema Nacional del Espacio Aéreo (NAS) de los Estados Unidos (EE. UU). La mayoría de las investigaciones sobre cortes de energía inducidos por rayos se han centrado en comprender los procesos físicos de sus efectos en las operaciones de las aeronaves y las rampas de

los aeropuertos. Los resultados preliminares, aquí mostrados para la zona de estudio, indican que la mayor densidad de rayos se localiza hacia la izquierda y derecha de la aproximación final para la pista 05, lo que implica que este procedimiento se pueda abortar, hasta que las condiciones del tiempo mejoren. También se reportan vientos perpendiculares a la pista que pueden despistar a la aeronave al aterrizar, ocasionando incidentes o accidentes fatales.

Índices de inestabilidad

La CAPE reportada para las tormentas analizadas tiene un comportamiento heterogéneo en el aeropuerto, lo que puede asociarse a la forma de

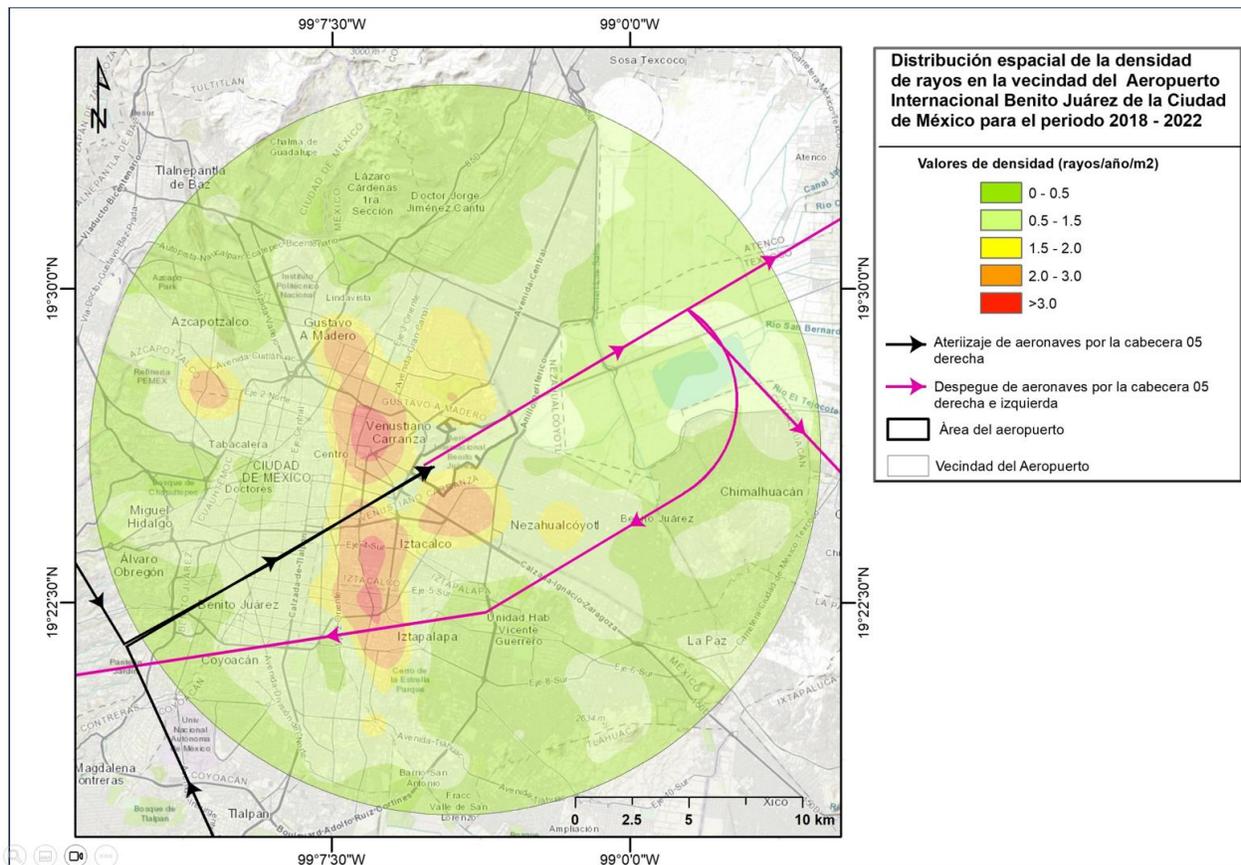


Figura 6. Distribución espacial de la densidad de rayos en la vecindad del AICM durante el periodo de 2018 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las Observaciones Meteorológicas Aeronáuticas del aeropuerto. Observaciones georreferenciadas por el Geostationary Lightning Mapper (GLM) por el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). Cartas aeronáuticas de procedimientos de aterrizaje y despegue. Sistema de coordenadas: WGS_1984_UTM_Zone_14N Proyección: Universal Transverse_Mercator (UTM). Datum: WGS1984

Valores medios de CAPE (J/Kg)	Tipos de tormentas	1200 UTC	1800 UTC
100 < 500	Unicelulares	83%	23%
500-1000	Multicelulares	7%	31%
> 1000	Super celulares	10%	46%

Tabla 2. Valores del CAPE y clasificación del tipo de tormentas generados a partir de los radiosondeos. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones de la estación de sondeo No. 76680.

relieve donde se localiza, además de la altura (Tabla 2). Los valores más altos del CAPE se registraron, para las tormentas de las 1200 UTC (06:00 hora local), con más de 3,500 J, representando únicamente el 2% de los casos. Los mayores reportes de este peligro se caracterizan, atendiendo a los valores de la CAPE, como marginalmente inestable (entre 0 – 1,000 J).

Para las observaciones de las 1800UTC (18:00 hora local) el valor más alto registrado fue de 7,939 J, aunque no se descarta la posibilidad de ser un error de medición. El segundo valor más alto registrado fue de 2,668 J. Las tormentas en este horario se caracterizan por un entorno marginal (0 – 1,000 J) a moderadamente (1,000 – 2,500 J) inestable. Los resultados son coincidentes con un estudio reciente sobre tormentas eléctricas y granizo en México (León *et al.*, 2023).

Atendiendo al criterio de los valores medios de la CAPE por Calvo (2021) (Tabla 2) los resultados a las 1200 UTC arrojaron que la mayor cantidad de tormentas reportadas en el aeropuerto son unicelulares con el 83%. A las 1800 UTC se observaron posibles tormentas super celulares con el 46%, seguido de las multicelulares con el 31%. Si bien la clasificación propuesta por la literatura contempla los valores de CAPE mencionados, se debe considerar que la definición de la morfología de tormentas debe integrar otras variables. En este sentido, un análisis más profundo empleando información de radares meteorológicos para investigación y/o satélite, es requerido para tener mayor certeza sobre el tipo de tormentas que se forman en el área de estudio.

La cizalladura del viento (Tabla 3) para el primer kilómetro sobre la superficie, parámetro importante para la predicción de tornados según Groenemeijer *et al.* (2021), no superó los 10 m/s

para las observaciones de las 1200 UTC y las 1800 UTC. Lo anterior coincide con los resultados de observación de los valores reales observados los cuales no hacen referencia a este tipo de condición de severidad. No obstante, los valores cercanos a 10 m/s representan el 12% de los datos (Tabla 3).

Los resultados de la cizalladura del viento para 2 km y 3 km a las 1200 UTC y 1800 UTC no muestran características de sucesos climáticos violentos, de acuerdo con los valores comúnmente empleados en latitudes medias

WS 1 km (m/s)	1200 UTC	1800 UTC
0-2 m/s	32%	29%
2.0- 4 m/s	32%	51%
4.0- 6 m/s	24%	11%
6.0 – 9 m/s	12%	9%

WS 6 km (m/s)	1200 UTC	1800 UTC
0-9	81%	86%
9.0 -1 9	17%	14%
20.0 - 29	0%	0%
30.0 - 40	2%	0%

WS 8 km (m/s)	1200 UTC	1800 UTC
0-9	81%	86%
9.0 -1 9	17%	14%
20.0 - 29	0%	0%
30.0 - 40	2%	0%

Tabla 3. Porcentaje de eventos para los diferentes niveles en que se calculó la cizalladura (WS) del viento para las 1200 y 1800UTC. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones de la estación de sondeo No. 76680.

(entre 15 – 25 m/s). No obstante, a esa altura se realizan los procedimientos de aproximación de las aeronaves, por lo que la prevención, vigilancia y monitoreo continúa siendo la premisa para evitar accidentes e incidentes aéreos.

Para el viento sobre los 6 km los resultados arrojaron que se observaron tormentas extremadamente severas si se toma como referencia que el 2% lo reportó atendiendo al criterio que utiliza Calvo (2021). A las 1800 UTC no se registraron valores para determinar qué tan severas son en cuanto a la intensidad de los vientos. El análisis para los 8 km explica que el 95% de las observaciones caracteriza a la cizalladura del viento como débil. Para las 1800 UTC se observa que aparecen de forma esporádica, cizalladura del viento moderada. Ello implica que existan tormentas multicelulares con un ciclo de vida más alto. Este resultado se asemeja a la duración de las tormentas, es decir, las que mayor tiempo de vida tienen se presentan muy pocas veces.

Observaciones meteorológicas aeronáuticas

Como muestra la Figura 7, la mayor cantidad de reportes de visibilidad se centra entre los 3 km y 5 km, lo que representa el 46% de las observaciones. Se observa, en segundo orden, un 36% de las observaciones que reportan valores de visibilidades entre 0 y 3 km. Este resultado tiene relación con el tipo de tormenta que se desarrolla para este tipo de peligro. Además, esta medición se realiza desde la percepción del observador y los puntos de referencia que tengan asignados en el aeródromo.

Los procedimientos de operación para vuelos que aterricen con instrumentos en el Área de Control Terminal México – Toluca (TMA, por sus siglas en inglés) y las zonas de control de los aeropuertos dentro de la misma establece, como criterio operacional, que el mínimo meteorológico dentro o en las inmediaciones del aeropuerto para la visibilidad es de 5 km o 3 millas terrestres (SENEAM, 2022). En este sentido, los resultados arrojan que el 79% de los reportes cumplen este requisito, por lo que la prevención y monitoreo para este tipo de variable es importante. No obstante, se analiza un tipo de tormenta, la más fuerte en el contexto aeronáutico, por lo que los resultados en la medición por el personal tienen un componente

perceptivo. Hasta la fecha, el aeropuerto no cuenta con equipos de medición para esta variable, atendiendo a las características termodinámicas, que permite reducir notablemente la visibilidad, por lo que es difícil encontrar mediciones con más de 5km. La contaminación atmosférica, el viento y la humedad son factores que cuando se conjugan con la ubicación geográfica del aeropuerto, afectan la visibilidad. El aeródromo de estudio no está exento de estos componentes.

Atendiendo al tipo de fenómeno se utilizan tres clasificaciones de cobertura nubosa, que permiten identificar los tipos de nube de la tormenta, definidos por el SENEAM (2019)

- Medio Nublado (SCT). La cubierta del cielo es la mitad o menos (entre 3/8 y 4/8).
- Nublado (BKN). La cubierta del cielo es más de la mitad, pero sin llegar a cubrir totalmente el cielo (entre 5/8 y 7/8).
- Cerrado (OVC). La cubierta del cielo es total (8/8).

Como muestra la Figura 7, el tipo de cobertura nubosa que predomina es el cielo cubierto con un 53% de representatividad, seguido de la cubierta del cielo más de la mitad, pero sin llegar a cubrir totalmente el cielo. Este resultado coincide con la definición de tormentas y criterio que se establece en la metodología para identificar este tipo de peligro. En ocasiones, posiblemente por errores de medición del observador, se reportaron nubes aisladas con tormentas eléctricas ligeras, lo que dificulta la interpretación de este fenómeno.

El mínimo meteorológico dentro o en las inmediaciones del aeropuerto para este tipo de variable (altura de la nube), según lo define (SENEAM, 2020), apéndice MMMX VAC-0, es de 457 metros (1,500 FT). Los resultados (Fig. 8) muestran que el 47% corresponde a mediciones entre los 900 y 1,500 pies (0.27 y 0.45 km de altura, respectivamente). En segundo orden, un 38% es observable para los casos entre 1,501 y 2,000 pies (0.457 y 0.609 km de altura, respectivamente). Estos resultados permiten concluir que este tipo de tormenta presentan variables que requieren de una vigilancia operativa y un monitoreo para su diagnóstico.

Sobre el viento perpendicular a la pista (es decir los vientos cruzados), los resultados muestran en la Figura 9 una mayor representatividad en los casos donde la dirección del viento se identificó

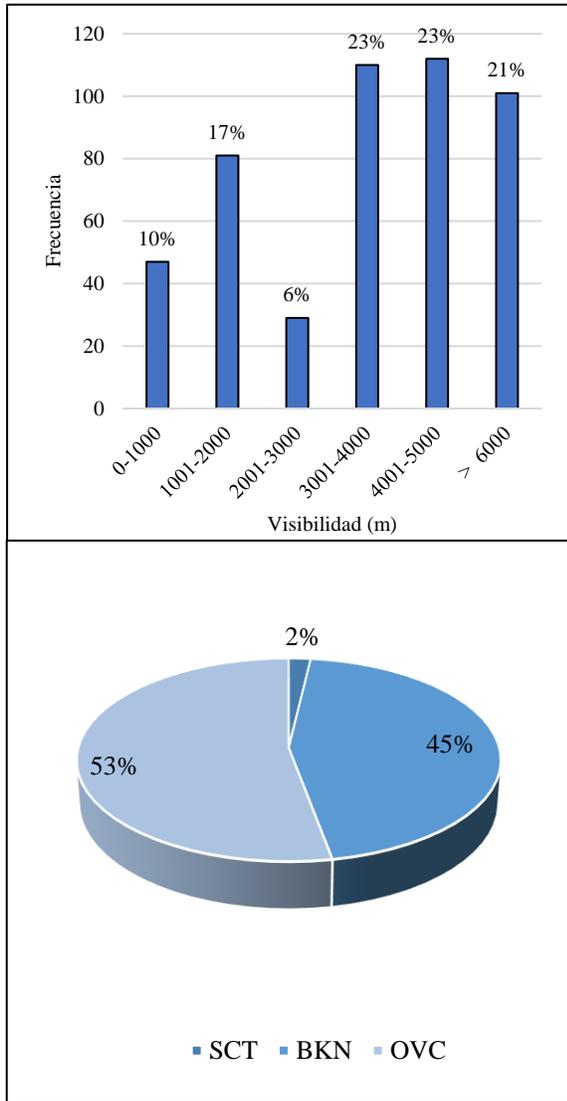


Figura 7. Visibilidad y tipos de nubes reportadas por las fuertes tormentas registradas en el AICM durante el periodo de 2018 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

en los 310 a 330 grados. Este resultado se podría asociar a que en esa dirección geográfica se visualizan alrededor del 52% de las fuertes tormentas. No se descartan otros factores como la irregular distribución de las masas de aire por los sistemas meteorológicos que inciden en el aeropuerto y la localización geográfica.

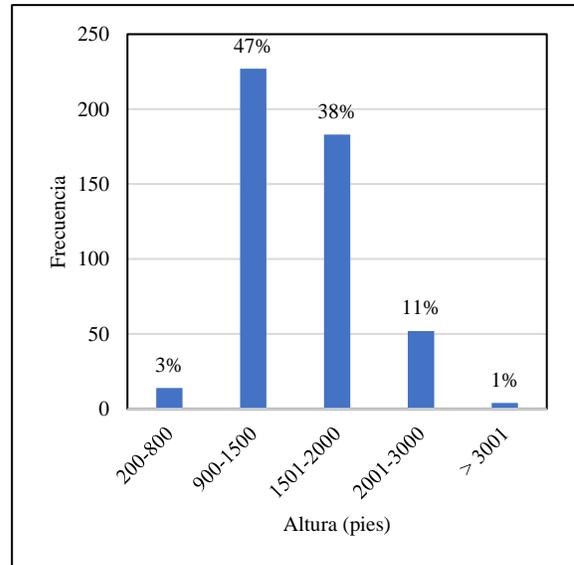


Figura 8. Altura de la base de las nubes reportadas por las fuertes tormentas registradas en el AICM durante el periodo de 2018 a 2022.

Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa.

<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>

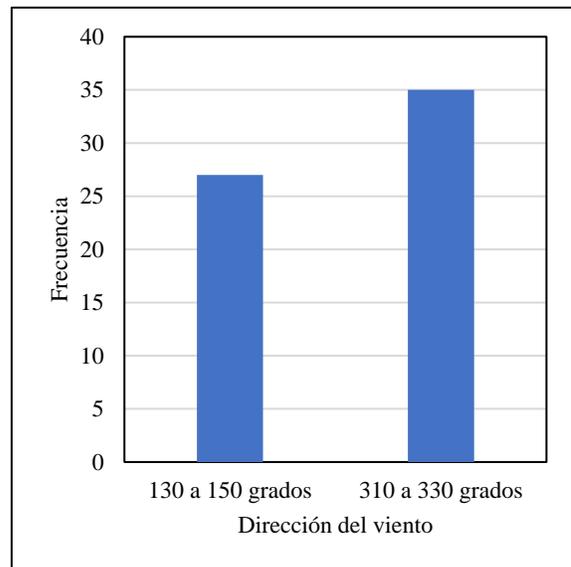


Figura 9. Dirección perpendicular del viento reportada por las fuertes tormentas registradas en el AICM durante el periodo de 2018 a 2022. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto.

Finalmente, los valores de las intensidades muestran que para ambas direcciones la mayor cantidad de casos se registran con intensidades de 11 a 20 nudos (5.6 a 10.2 m/s, respectivamente) y en segundo orden de 21 a 30 (10.8 a 15.4 m/s). Estos valores son significativos para aeronaves de ala fija como de tipo Boeing y AirBus y de ala rotativa, en la pista seca o mojada, dado que así lo establece sus componentes técnicos de fabricación.

Conclusiones

En esta investigación se presenta una caracterización de las fuertes tormentas eléctricas en el AICM y sus inmediaciones durante el periodo 1990 – 2022. Empleando información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas, imágenes de percepción remota, así como radio sondeos. Se exponen algunas de las características más importantes de las tormentas observadas en el espacio aéreo de uno de los principales aeropuertos del país. Los principales hallazgos de la investigación fueron:

- Las tormentas eléctricas se presentan en mayor porcentaje durante el verano (particularmente septiembre), entre las 0300 y 0500 UTC (21:00-23:00 hora local), y tienen una duración preferencial entre 11-20 minutos.

- El año 2014 fue cuando se registraron mayor cantidad de eventos y se identificó una tendencia de incremento, principalmente entre los meses de mayo a octubre. El resto de los meses se muestra una tendencia de decremento.

- La referencia geográfica de las observaciones en la vecindad muestra que las tormentas se reportan al suroeste, oeste y noroeste, coincidiendo con el área donde se realizan las operaciones aéreas de aterrizaje por la cabecera 05 izquierda y derecha.

- Los radios sondeos arrojaron que la CAPE tiene un comportamiento heterogéneo. En este sentido, las tormentas se caracterizan por valores de CAPE marginal a moderadamente inestable; mientras que la mayor cantidad de tormentas que se reportan en el aeropuerto se consideran unicelulares.

- La cizalladura del viento identificada (en los primeros 8 km) es débil en la mayoría de los

casos. En las otras capas no superan los valores que arrojen características de sucesos climáticos violentos.

- Los resultados de las variables visibilidad, altura de la base de la nube, tipo de nube y la componente vertical del viento evidencian que el tipo de tormenta que se desarrolla en el aeropuerto requiere de monitoreo para un análisis predictivo.

Los resultados de esta investigación pueden emplearse para identificar las condiciones de riesgo asociadas a las tormentas eléctricas en uno de los aeropuertos más concurridos a nivel nacional y mundial. Futuros estudios deberán centrarse en análisis similares para otros aeropuertos a nivel nacional.

Agradecimientos

El presente estudio tuvo el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) No. de beca: 1156496 y del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM, Proyecto PAPIIT IA101722. Se agradece al Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) por proveer la georreferenciación de los datos sobre rayos.

Referencias

- ASN. Aviation Safety Network. Aviation Safety Database.
<https://aviation-safety.net/database/index.php>. Consultado 5 de enero del 2023.
- Baleriola, M., Ledesma, M., (2007). Meteorología Aplicada a la Aviación. Paraninfo, 12ª Edición, ISBN: 84-283-2894-27.
- Blamey, R.C., Middleton, C., Lennard, C., Reason, C.J.C. (2017). A climatology of potential severe convective environments across South Africa. *Climate Dynamics*, 49, 2161-2178.
<https://doi.org/10.1007/S00382-016-3434-7>
- Brown, M.E. Jackson, J.D. (2009). Sounding-derived low-level thermodynamic characteristics associated with tornadic and non-tornadic supercell environments in the Southeast United States. *National Weather Digest*, 33, 16-26.
- Calvo, S.C. (2021). Caracterización de los ambientes convectivos que favorecen el

Wilson, J., Wakimoto, R. (2001). The discovery of Downburst: T.T. Fujitas Contribution. Bulletin of American Meteorological Society, 82,

Zhou, Z., Zhang, Q., Allen, J.T., Ni, X. Ng, C.P. (2021). How many types of severe hailstorm environments are there globally? Geophysical Research Letters, 48, e95485.
<https://doi.org/10.1029/2021GL095485>

Zrnic, D.S., Doviak, R.J., Lee, J.T., Eilts, M.D. (1987). Oklahoma weather phenomena that may affect aviation. Journal of Aircraft, 24, 310-316.
<https://doi.org/10.2514/3.45446>