

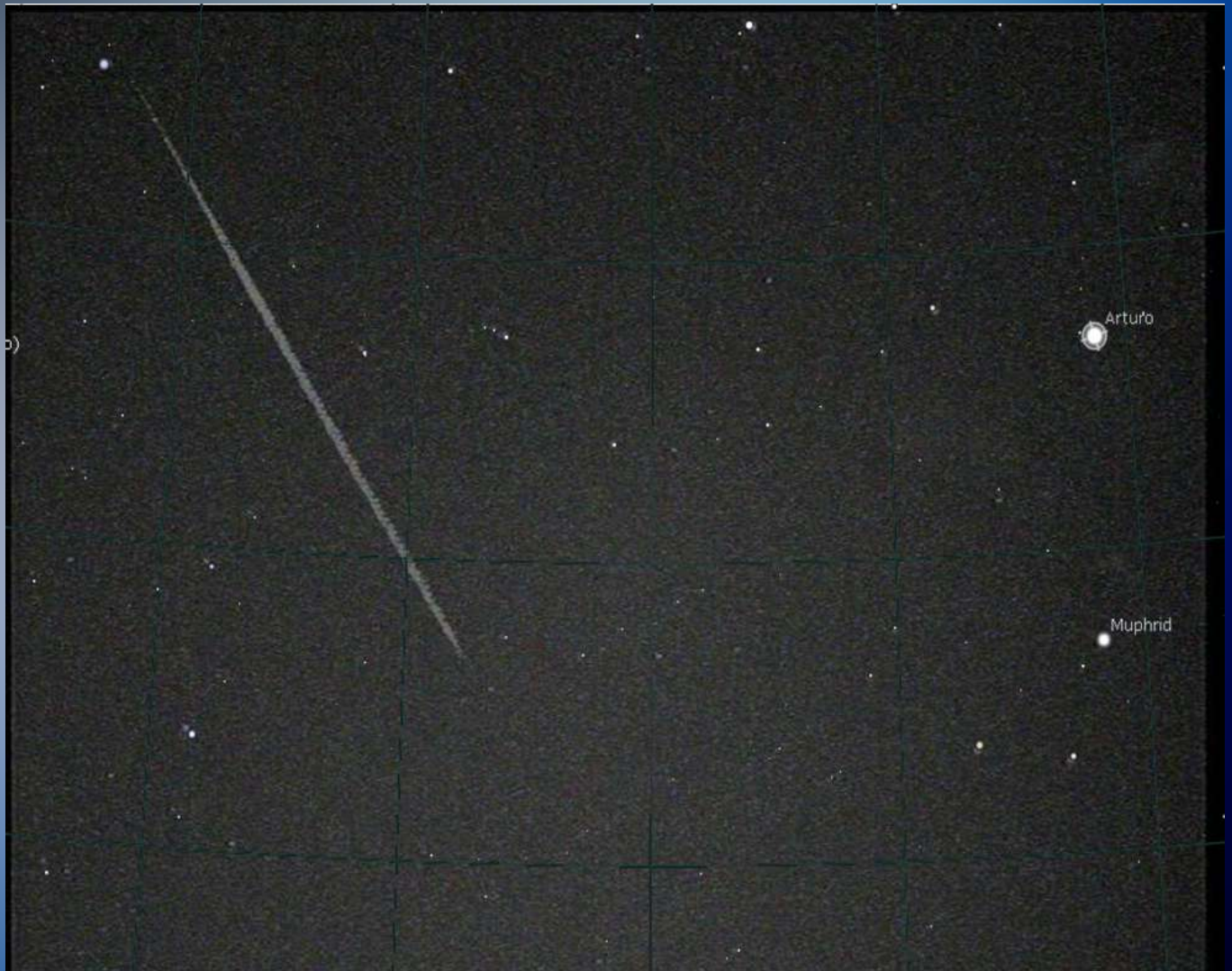


CIENCIAS ESPACIALES

Publicación Semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales (FACES)

Volumen 16, Número 2, Otoño 2025

ISSN 2225-5249 (Impreso), ISSN 2521-5868 (en línea)



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS

Ciencias Espaciales

Facultad de Ciencias Espaciales (FACES)
Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH)
Tegucigalpa, M.D.C., Honduras

Volumen 16, Número 2 Otoño, 2025. ISSN 2225-5249 (impreso); ISSN 2521-5868 (en línea)

Portada

Fotografía tomada desde las instalaciones del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa por el profesor Hugo Heomar Ramos Castro, en la noche del 17 de agosto del 2015, captando la traza de un meteoro.

Director

Ph.D. FRAS Javier Mejuto González
(Facultad de Ciencias Espaciales, UNAH)

Editor en Jefe

Máster Eduardo Enrique Rodas-Quito
(Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, UNAH)

Consejo Editorial

Máster Ricardo Antonio Pastrana
(Astronomía y Astrofísica, UNAH)
Máster Celina Michelle Sosa Caballero
(Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, UNAH)
Máster Javier Enrique Meza Antúnez
(Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, UNAH)
Máster Alex Matamoros
(Ciencias Aeronáuticas, UNAH)

Consejo Científico

Ph. D. Jacopo Fritz
(Universidad Nacional Autónoma de México, México)
Ph. D. Francisco Maza Vásquez
(Universidad de Alcalá, España)
Ph. D. Stanislaw Iwaniszewski
(Instituto Nacional de Antropología e Historia, México)
Profesor José Nicolás Balbi
(Museo del Observatorio de Física Cósmica de San Miguel, Provincia de Buenos Aires, Argentina)

Edición, arte y diagramación

Máster Eduardo Enrique Rodas-Quito
(Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, UNAH)
Ph.D. FRAS Javier Mejuto González
(Facultad de Ciencias Espaciales, UNAH)

Contacto

Ph.D FRAS Javier Mejuto González
javier.mejuto@unah.edu.hn
Máster Eduardo Enrique Rodas Quito
eduardo.rodas@unah.edu.hn

Para mayor información:

Página web:
<https://www.camjol.info/index.php/CE/index>

Correo electrónico:
revista.cespaciales@unah.edu.hn

*Facultad de Ciencias Espaciales.
El 17 de abril de 2009, mediante Acuerdo N° CU-O-043-03-2009, el Consejo Universitario de la UNAH creó la Facultad de Ciencias Espaciales en reconocimiento al funcionamiento del Observatorio Astronómico Centroamericano de Suyapa (OACS/UNAH).*

La Revista Ciencias Espaciales es una publicación semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales y se publica en los meses de junio y diciembre de cada año. El contenido de cada artículo es responsabilidad de su(s) autor(es).

CONTENIDO

Volumen 16, Número 2 Otoño, 2025

ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

4

Metodología para determinar algunos parámetros físicos de meteoroides a partir de la observación de sus meteoros, utilizando una sola cámara 5

Hugo Heomar Ramos-Hernández y Guadalupe Cordero-Tercero

ARQUEOASTRONOMÍA Y ASTRONOMÍA CULTURAL

18

Menhires en Sudamérica. Manifestación cultural en el centro de la Argentina. Expediciones, orientaciones astronómicas y cuidado patrimonial 19

José Nicolás Balbi

CIENCIAS AERONÁUTICAS

34

Taxonomía de Amenazas en AVSEC: Del Daño al Delito 35

Roberto Sánchez Escobar

Mapas de probabilidad para identificar infraestructura aeroportuaria en riesgo por ceniza del Volcán Popocatepetl 49

Roberto Sánchez Escobar

NOTAS INFORMATIVAS

67

Política Editorial e Instrucciones a los Autores 68

ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOS DE METEOROIDES A PARTIR DE LA OBSERVACIÓN DE SUS METEOROS, UTILIZANDO UNA SOLA CÁMARA

Hugo-Heomar Ramos-Hernández^{1,*}; Guadalupe Cordero-Tercero^{2,†}

¹Máster en Astronomía y Astrofísica, Dpto. de Astronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.

²Dra. en Física Espacial, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, 04150 CDMX, México.

Recibido: 10-07-2025

Aceptado: 20-01-2026

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i2.22035>

RESUMEN

Durante décadas se ha investigado el comportamiento físico del material asteroidal y cometario cuando interactúa con la atmósfera terrestre. Estos objetos presentan distintas composiciones que varían de la rocosa a la metálica, pasando por una mezcla de ellas. El material cometario, además de su componente rocosa, contiene hielo de algunos compuestos volátiles. Los objetos que ingresan a la atmósfera de la Tierra lo hacen a velocidades geocéntricas de entre 11 y 70 km/s y a ángulos de impacto de entre 0° y 90°. Dichos objetos sufren una serie de fenómenos producto de su interacción con la atmósfera y, si ellos llegan a la superficie de la Tierra con suficiente energía cinética, también pueden crear cráteres de impacto. Al fenómeno lumínico producido por la interacción de cuerpos menores con la atmósfera se conoce como meteoro. En este trabajo se plantea un método para estimar algunos parámetros físicos de meteoroides a partir de la observación de sus meteoros, por medio de registros de videos tomados por una cámara sensible al infrarrojo, instalada en el edificio K1 de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Para el análisis de los datos se emplearon herramientas especializadas como Stellarium, ImageDS9, UFOCapture y Fitswork4. A partir de los videos capturados, y mediante un conjunto de transformaciones y procesos de calibración, se determinaron las trayectorias de los objetos en coordenadas ecuatoriales, así como las velocidades y aceleraciones angulares de los meteoroides. Si bien en las redes de meteoros instaladas en otras partes del mundo este es un proceso bien conocido, los dos objetivos de este trabajo fueron evaluar qué tanto se puede saber de este fenómeno utilizando una sola cámara y entender lo que se ha hecho para apropiarnos de ese conocimiento con la intención de planear el trabajo futuro.

Palabras clave: Asteroide, meteoroides, meteoro, observaciones, cámara.

ABSTRACT

For decades, the physical behavior of asteroidal and cometary material when it interacts with the Earth's atmosphere has been investigated. These objects have compositions that range from rocky to metallic, with a mix of both. The cometary material contains a rocky component and volatile ice.

*hugo.ramos@unah.edu.hn.  <https://orcid.org/0000-0002-5024-9141>

†gcordero@igeofisica.unam.mx.  <https://orcid.org/0000-0001-8135-9792>

Objects entering the Earth's atmosphere do so at geocentric speeds between 11 and 70 km/s and at impact angles between 0° and 90° . These objects undergo a series of phenomena as they interact with the atmosphere, and if they reach the Earth's surface with sufficient kinetic energy, they can create impact craters. The phenomenon produced by the interaction with the atmosphere, the emission of light, is known as a meteor. In this research, a method is proposed to estimate certain physical parameters of meteoroids from observations of their meteors, based on video recordings taken by a sensitive infrared camera located in the K1 building of the Faculty of Sciences at the National Autonomous University of Honduras. Using a series of software (Stellarium, ImageDS9, UFOCapture, Fitswork4), the videos obtained were analyzed, and, based on these data and a set of transformations, their angular velocity and acceleration were estimated. Although this is a well-known process in the Meteor Networks installed in other parts of the world, the two objectives of this work were to evaluate how much we get to know about this phenomenon using a single camera and to understand what has been done to appropriate that knowledge to plan future work.

Keywords: Asteroid, meteoroid, meteor, observations, camera.

1 Introducción

Cada día ingresan a la atmósfera terrestre toneladas de material de naturaleza asteroidal y cometaria: más de 1000 kg, según [Passey y Melosh \(1980\)](#), y entre 3 y 300 toneladas métricas, según [Plane \(2012\)](#). La forma de estos objetos es irregular y sus tamaños son diversos. Cuerpos de dimensiones mayores, menos comunes y con mayores energías cinéticas, pueden atravesar la atmósfera y llegar a la superficie de la Tierra con suficiente energía cinética como para producir un cráter de impacto ([Passey y Melosh, 1980](#)). Algunos de estos grandes impactos seguramente modificaron la superficie de nuestro planeta, como lo han hecho impactos similares en otras superficies planetarias, y afectaron profundamente los ecosistemas terrestres. Un ejemplo de esto último fue la formación del cráter de impacto de Chicxulub, cuyo choque y fenómenos posteriores relacionados con él, ocasionaron la extinción de los grandes saurios (p. ej. [Alvarez et al. \(1980\)](#); [Longrich et al. \(2012\)](#)).

La densidad de la atmósfera terrestre empieza a ser apreciable alrededor de los 100 km de altura. En esa zona, el choque de las partículas del aire con el material asteroidal o cometario hace que estos objetos se empiecen a calentar, posteriormente, se fundirán y evaporarán (es decir, perderán masa, se ablacionarán). El aire atmosférico y el vapor del objeto se ionizan produciendo la emisión de luz (en primera aproximación, también se supone que el objeto emite una radiación de cuerpo negro). Esta luz se conoce como meteoro, o como bólido si el meteoro es más brillante que el planeta Venus. En el momento en que la luz cesa, es decir, cuando deja de perder masa por alcanzar la velocidad terminal, ya no es posible observarlo a simple vista ([Ceplecha et al., 1998](#)).

El análisis de la traza del meteoro nos proporciona información sobre la trayectoria de pre-entrada a la atmósfera del cuerpo cósmico, la trayectoria seguida durante su caída y del material del cual está hecho. Las antiguas civilizaciones orientales de China, Japón y Corea observaron y registraron meteoros, lluvias de estrellas y caídas de meteoritos desde hace muchos siglos: Japón desde el 636 e.c, Corea desde el 57 a.e.c y China desde el 645 a.e.c. ([Yang et al., 2005](#)). Durante la Edad Media y el Renacimiento también se realizaron observaciones en Europa, aunque no en forma tan sistemática como lo hicieron en Asia ([Marvin, 2006](#)).

En el siglo XVIII, una de las interrogantes acerca de los meteoros era la altura a la cual se producía el fenómeno ([Marvin, 2006](#)). Ernst Chladni, el padre de la meteorítica, sugirió a Georg Christoph Lichtenberg realizar observaciones de meteoros durante una lluvia de estrellas desde dos puntos distintos sobre

la superficie de la Tierra, para estimar la altura y la trayectoria reales del objeto. Lichtenberg encargó esta tarea a dos de sus estudiantes: Johann Friedrich Benzenberg y Heinrich Wilhelm Brandes. Entre septiembre y octubre de 1798, con una distancia entre ellos de 15.61 km, observaron 402 meteoros de los cuales 22 fueron comunes. A partir de sus observaciones, Benzenberg y Brandes concluyeron que los meteoros ocurrían a alturas entre 26 km y 170 km moviéndose a velocidades de entre 29 y 44 km/s (Marvin, 2006). El método de observación propuesto por Chladni se emplea actualmente utilizando varias estaciones de observación.

Además de observaciones “a ojo”, en las últimas décadas se han desarrollado más formas de observar la entrada de asteroides y material cometario a la atmósfera terrestre; entre éstas se encuentran fotografías, videos, radar, infrasonido, sonido y LIDAR (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2008). De estos métodos, el registro de meteoros por medio de videos es el más extendido, entre otras cosas, por ser el método más barato y por brindar una amplia información. Esta es la razón por la cual este estudio se realizó empleando el método de registro de meteoros mediante videos.

En el presente trabajo se obtuvieron algunos parámetros físicos de meteoroides que ingresaron a la atmósfera terrestre en el cielo de Tegucigalpa, Honduras, y fueron registrados desde el edificio K1 de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Para esta investigación se contó con una base de datos de alrededor de 400 meteoros, captados desde el mes de octubre de 2018 hasta inicios de abril de 2019, de los cuales se seleccionaron 5 videos. El criterio de selección fue que el video mostrara una traza del meteorito suficientemente grande como para contar con un buen número de datos para analizar, así como una buena nitidez en sus imágenes, cuadro por cuadro.

El presente documento está organizado en secciones, cada una de las cuales aborda diferentes aspectos. En la sección 2 se presenta en detalle la metodología aplicada tanto para el manejo de las imágenes como para el análisis de datos. Los resultados obtenidos se describen en la sección 3. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

2 Metodología y obtención de datos

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos de analizar una serie de videos donde se observan meteoros, con la intención de estimar velocidades y aceleraciones angulares de los objetos cósmicos registrados, así como sus trayectorias proyectadas en la bóveda celeste. Dicha determinación se realizó a partir de videos obtenidos por una única estación de observación compuesta por una sola cámara. Como la mayoría de este material es menor a unos cuantos metros, en nuestro escrito les llamaremos meteoroides (Cordero-Tercero *et al.*, 2023).

La obtención de la información de los meteoros asociados a la entrada de meteoroides se llevó a cabo en dos partes: la primera consistió en depurar la imagen original y la segunda en emplear la información de la imagen resultante para calcular algunos parámetros tales como la velocidad angular y la aceleración angular del meteoritoide. En las siguientes secciones describiremos el método con detalle.

2.1 Características generales del equipo y lugar de observación

2.1.1 Característica de la cámara, ubicación, tiempo de observación

La cámara empleada es una Watec-902H (EIA, CCIR). Dicha cámara se colocó en la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, empotrada en un tubo sobre el techo del

edificio K1 a una altura de 4 m sobre el piso (ver imagen 1). Las coordenadas del sitio de observación son $14^{\circ}5'14.75''$ N, $87^{\circ}9'34.69''$ O. El centro del campo de visión de la cámara se orientó hacia el zenit del sitio de observación. Esta elección se hizo por dos razones: la primera para evitar la mayor contaminación lumínica posible y la segunda porque sólo se cuenta con una cámara y, como los meteoroides no tienen una dirección preferencial de caída, en realidad no importaba tanto la dirección a la cual se dirigiera (a menos que se quiera observar una lluvia de estrellas en particular, en cuyo caso sí convendría cambiar la dirección hacia el radiante de la lluvia de estrellas). El periodo de observación empleado para registrar meteoros desde Tegucigalpa, Honduras es de 12 horas: de 17:30 h a 5:30 h. La razón de esto es la facilidad para observar meteoros durante la noche y el hecho de que las observaciones diurnas causan problemas tanto en el equipo como en el sistema de almacenamiento.



Figura 1: En el lado izquierdo de esta figura se muestran distintas tomas de la cámara empleada. En la imagen de la derecha se muestra la posición de la cámara durante el tiempo de observación. Fotografías tomadas por Ramos-Hernández en 2018.

2.2 Descripción del software empleado

En nuestro trabajo utilizamos una serie de programas para la detección de meteoros, la conversión de imágenes y la extracción de las coordenadas de imagen del meteorito, cuadro por cuadro. Es importante hacer notar que todo el software empleado es de uso libre (Fitwork, SAOImage DS9, Stellarium) o cuenta con un periodo de prueba gratuito (UFO Capture, 30 días). Describiremos brevemente estos programas en los párrafos siguientes.

2.2.1 Descripción del UFO Capture

El UFO Capture es un software de captura de video que puede programarse para captar objetos en movimiento (SonotaCo, 2025). Cuando se programa de esta manera, el software comienza a grabar en el disco duro de una computadora desde unos pocos segundos antes de que se reconozca un objeto en movimiento hasta unos pocos segundos después de que finalice dicha acción. En este enlace: http://sonotaco.com/e_index.html, se pueden consultar más detalles.

2.2.2 Descripción de Fitswork

Fitswork es un programa de tratamiento de imágenes diseñado especialmente para propósitos astronómicos (Dierks, *sf*). Dentro de su entorno y funcionalidad está el procesamiento de imágenes. Fitswork es fácil de manejar y está diseñado para la astrofotografía. En nuestro trabajo solamente usamos Fitswork como herramienta para convertir la imagen en formato .jpg que genera el UFO Capture a formato .fits. Esto se debe a que los programas en astronomía solo pueden leer este último tipo de formato. En este enlace: https://www.fitswork.de/software/softw_es.php, se puede descargar el software y obtener más información.

2.2.3 Descripción de SAOImage DS9

SAOImage DS9 es una aplicación de visualización de datos e imágenes astronómicas (Joye, 2019). Admite imágenes en formato .fits, permite manipular regiones y cuenta con numerosos algoritmos; además, facilita la comunicación con tareas de análisis externas y es compatible con diferentes sistemas operativos. SAOImage DS9 es una aplicación independiente; no requiere instalación o archivos de soporte. SAOImage DS9 tiene funciones tales como imágenes en mosaico, marcadores geométricos, manipulación de mapas de colores, escalado, zoom arbitrario, recorte, rotación, desplazamiento y una variedad de sistemas de coordenadas que sirven para análisis de imágenes. En este enlace: <http://ds9.si.edu/site/Home.html>, se encuentran las especificaciones y uso del programa. En nuestro estudio, contribuye a extraer las coordenadas de la traza del meteoro.

2.2.4 Descripción de Stellarium

Stellarium es un motor de simulación cuyo objetivo es mostrar la bóveda celeste tanto para poder visualizar estrellas y planetas que a simple vista no se ven debido a la contaminación lumínica y atmosférica como para trabajos en arqueoastronomía, donde se necesita identificar posiciones de cuerpos cósmicos relacionados con construcciones hechas por el ser humano en distintas épocas históricas (Zotti *et al.*, 2021). Stellarium se puede utilizar tanto como una aplicación en el celular como en un equipo de cómputo.

2.3 Tratamiento de las imágenes

2.3.1 Formatos de la información obtenida

Cuando registramos un meteoro mediante el UFO Capture se crean varios archivos en distintos formatos: .avi (muestra el video completo del inicio al final del meteoro), .bmp (exhibe parte de la traza del meteoro delimita por un rectángulo), .jpg (muestra la traza del meteoro en una imagen de 720 px de largo por 576 px de alto), .jpg (muestra la traza del meteoro y un recuadro que contiene parte de esa traza). En este caso, la imagen tiene 320 px de largo por 240 px de alto) y .xml (muestra algunas coordenadas (x,y) de la traza del meteoro; es decir, es un archivo de datos) (ver Figura 2). Para obtener los datos, es necesario depurar primero las imágenes. Para esto se lleva a cabo una serie de correcciones que describiremos en los siguientes párrafos.

2.3.2 Dark

El Dark es un proceso que se emplea para identificar los pixeles dañados del CCD de la cámara. Este se obtiene de dos formas: a) tapando la cámara con una tela o base oscura y generando un video de 1 a 2 segundos; este video se introduce a un programa para separarlo cuadro por cuadro de los cuales se eligen 5 que nos muestren los pixeles dañados y b) se expone la cámara al cielo nocturno y se elige un valor de

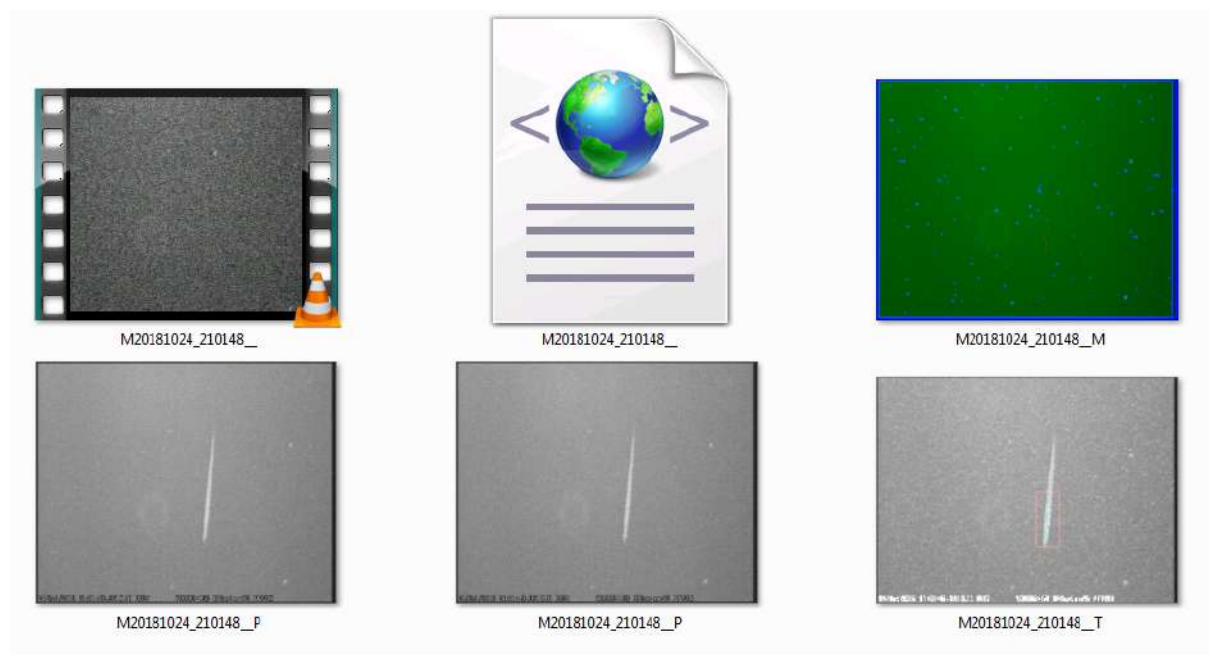


Figura 2: En la imagen se observan los archivos generados por el software UFO Capture. En la fila superior, de izquierda a derecha, se muestran una captura de video en formato .avi, un archivo en formato .xml que proporciona los datos de la traza del meteorito y una imagen en formato .bmp, presentada en color verde. En la fila inferior, de izquierda a derecha, se presentan: la imagen de la traza del meteorito en formato .jpg (resolución de 720 x 576 píxeles); una imagen en formato .jpg (320 x 240 píxeles); y, finalmente, la imagen en formato .jpg (archivo), en la que se muestra parte de la traza del meteorito dentro de un recuadro rojo.

saturación cero en el programa de UFOCapture; bajo estas condiciones se toma un video 1 a 2 segundos; finalmente se toman 5 cuadros como en el caso del inciso (a). Independientemente del método empleado, de los 5 cuadros obtenidos se elige aquel donde los pixeles dañados del CCD se registren mejor. A este cuadro le llamamos el Dark y servirá para diferenciar los pixeles dañados de las estrellas de referencia (ver Figura 3).

2.4 Identificación de estrellas de referencia y obtención de algunas cantidades físicas

Una vez que determinamos el Dark, se cuentan con las condiciones necesarias para identificar las estrellas de referencia que se emplearán para determinar algunos parámetros del meteorito, en particular, la localización de su traza en coordenadas ecuatoriales.

Para llevar a cabo la identificación de las estrellas de referencia se realizó lo siguiente: a) comparamos la imagen obtenida durante el proceso de Dark (ver Figura 3), con la imagen original de la traza del meteorito generada por UFOcapture con la intención de diferenciar entre los pixeles dañados y las estrellas de referencia, b) buscamos en el programa Stellarium la zona del cielo observada considerando la fecha, hora y coordenadas geográficas del observador en el momento de la grabación del meteorito; c) superpusimos la imagen original (Figura 4) con la captura de pantalla realizada mediante Stellarium (Figura 5). Mediante esta superposición es posible identificar las estrellas de referencia (Figura 6), d) una vez identificadas las estrellas de referencia de la manera descrita anteriormente, por medio de la base de Stellarium se obtienen los nombres y las coordenadas ecuatoriales (ascensión recta y declinación) de las estrellas de referencia.



Figura 3: En esta imagen se muestran los pixeles dañados encerrados en círculos azules. Esto contribuye a identificar las estrellas de referencia.

2.5 Comparación de la traza meteoro con los datos obtenidos por UFO Capture

Entre la información proporcionada por el software UFO Capture está el archivo en formato .xml, el cual contiene las coordenadas de imagen (x,y) de algunos puntos de la traza del meteoro. Con estos datos, hicimos un gráfico en Microsoft Excel© con el objetivo de verificar que las coordenadas del archivo .xml correspondieran con las de la traza del meteoro dada por la imagen obtenida con el UFO Capture. Esas coordenadas se emplearon posteriormente para determinar la velocidad y la aceleración angulares del objeto. Por otro lado, si cuando se fragmentaba el video obtenido por UFO Capture se obtenía un número mayor de cuadros que de puntos registrados en el documento .xml, no a todos los cuadros se les podía asignar un punto del citado documento; cuando esto ocurría, se prefería obtener las coordenadas de imagen leyéndolas de la figura de la traza del meteoro generada por UFOCapture, de lo contrario, se utilizaban las coordenadas del documento .xml.

2.6 Cálculo de la velocidad angular

Para calcular la velocidad angular, primero es necesario determinar la posición del meteoroides sobre la esfera celeste durante el tiempo de observación. Lograr esto implica realizar una transformación de coordenadas de imagen (x,y) a coordenadas ecuatoriales (α , δ). Para lograr esto, primero se delimita la zona en la imagen donde está la traza del meteoro “encerrándolo” en un polígono cuyos vértices son las estrellas de referencia alrededor de la traza y después se obtienen las coordenadas del centro geométrico de dicho polígono (Cornejo-Patiño (2017) y referencias citadas en ese trabajo de tesis). En primera aproximación, consideramos que este punto coincide con el punto de tangencia de un plano perpendicular a la línea de



Figura 4: Traza del meteoro y estrellas de referencia.



Figura 5: Imagen de Stellarium que sirvió para identificar las estrellas de la Figura 4.



Figura 6: Superposición de la imagen original de la traza del meteoro (Figura 4), con la imagen obtenida de Stellarium (Figura 5).

visión del observador. Dicho esto, el punto de tangencia se determina mediante la expresión:

$$T = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = (A, D) \quad (2.1)$$

donde n es el número de estrellas de referencia con coordenadas ecuatoriales (α_i, δ_i) con $i=1, \dots, n$. Sabiendo las coordenadas ecuatoriales de cada estrella de referencia y las coordenadas del punto tangente T , determinamos las coordenadas estándar ξ_i y ψ_i de cada estrella de referencia. Estas coordenadas son las posiciones de las estrellas de referencias sobre el plano tangente a la línea de visión del observador y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\sin(\alpha_i - A) \cos \delta_i}{\sin \delta_i \sin D + \cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \cos D} \\ \psi_i &= \frac{-\cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \sin D + \sin \delta_i \cos D}{\sin \delta_i \sin D + \cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \cos D} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Una vez determinadas las coordenadas estándar, y de las estrellas de referencia procedemos a determinar las ecuaciones de transformación que nos permitan pasar de coordenadas (x, y) sobre la fotografía a coordenadas estándar ξ_i y ψ_i y de ahí a coordenadas ecuatoriales (ξ_i, ψ_i) . Las expresiones 2.3 a 2.9 permiten

calcular una serie de parámetros que sirven como auxiliares para obtener las ecuaciones de transformación mencionadas.

$$A = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

$$B = \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.4)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (2.5)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (2.6)$$

$$E = \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \quad (2.7)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \xi_i x_i + \psi_i y_i \quad (2.8)$$

$$G = \sum_{i=1}^n \xi_i y_i - \psi_i x_i \quad (2.9)$$

A partir de los parámetros anteriores se calculan otros parámetros u_1 a u_5 :

$$\begin{aligned} u_1 &= nF - AC - BD \\ u_2 &= nG - BC + AD \\ u_3 &= -AF - BG + EC \\ u_4 &= -BF + AG + ED \\ u_5 &= \frac{1}{nE - (A^2 + B^2)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

y de ellas se encuentra una relación entre las coordenadas de imagen y las coordenadas estándar:

$$\begin{aligned} \xi_j &= u_5(u_1 x_j + u_2 y_j + u_3) \\ \psi_j &= u_5(-u_2 x_j + u_1 y_j + u_4) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Finalmente, se obtiene una expresión que relaciona las coordenadas estándar y las coordenadas del punto de tangencia con las coordenadas ecuatoriales de los puntos sobre la imagen:

$$\begin{aligned} \alpha_j &= A + \tan^{-1} \left(\frac{-\xi_j}{\cos D - \psi_j \sin D} \right) \\ \delta_j &= \sin^{-1} \left(\frac{\psi_j \cos D + \sin D}{\sqrt{\psi_j^2 + \xi_j^2 + 1}} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde α_j y δ_j son la ascensión recta y la declinación sobre la esfera celeste de algún punto de coordenadas estándar ξ_j y ψ_j (Cornejo-Patiño, 2017). Con el procedimiento recién descrito, se puede pasar de

las coordenadas (x,y) de cualquier punto sobre la imagen a sus coordenadas ecuatoriales (α, δ) . Una vez conocidas la ascensión recta y la declinación de los puntos de la traza del meteoro, obtenidos mediante el procedimiento recién descrito, determinamos la distancia angular entre dos puntos consecutivos de la traza del meteoro, es decir entre las posiciones del meteoro en cada dos cuadros consecutivos del video. La distancia angular entre dos puntos sobre la superficie de una esfera está dada por:

$$\cos b = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2.13)$$

donde b representa la distancia angular entre dos puntos de coordenadas (α_1, δ_1) y (α_2, δ_2) sobre la esfera.

Luego, de obtener la distancia angular b , calculamos la velocidad angular promedio del objeto dividiéndola entre el tiempo transcurrido entre dos cuadros consecutivos.

3 Resultados y discusión

En esta sección mostramos los resultados obtenidos del análisis de cinco meteoros observados con fechas de 24 de octubre, 14 de noviembre, 30 noviembre y 14 de diciembre de 2018 y 10 de enero de 2019.

3.1 Cálculo de la velocidad y aceleración angulares

A partir de las coordenadas de imagen y de las posiciones de las estrellas de referencia, aplicamos el método descrito para obtener las coordenadas ecuatoriales de la traza del meteoro a partir de sus coordenadas de imagen. Para evaluar qué tan buena es esta transformación, aplicamos las ecuaciones a las coordenadas (x,y) de las estrellas de referencia para obtener sus coordenadas ecuatoriales, las cuales comparamos con sus coordenadas obtenidas mediante Stellarium por medio de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\text{Posición observada} - \text{Posición calculada}}{\text{Posición observada}} \right) \times 100$$

la cual nos permitió estimar el error porcentual en las posiciones calculadas de las estrellas de referencia mediante las ecuaciones de transformación. Todos los errores obtenidos fueron menores a 0,8 % en ascensión recta y a 6,5 % en declinación. Estos son errores bastante razonables, por lo cual podemos decir que las ecuaciones de transformación obtenidas resultan aceptables para describir el movimiento del objeto.

A partir de las posiciones de la traza del meteoro y por tanto del objeto, se obtuvo la distancia angular media recorrida por éste entre cada par de cuadros. Una vez calculadas las distancias angulares y los tiempos entre cada par de cuadros consecutivos, procedimos a hacer gráficas de velocidad angular vs. tiempo para cada uno de los meteoros estudiados. Los datos en todas las gráficas se ajustaron muy bien a regresiones cuadráticas pues todos los ajustes tuvieron un coeficiente de correlación del orden de 0.99. Los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

3.2 Comentario sobre la visibilidad de los meteoros

La visibilidad de los meteoros dependerá de la contaminación lumínica y atmosférica del lugar donde se encuentre el observador. De acuerdo con la escala de Bortle, la calidad del cielo en Tegucigalpa, Honduras, tiene un valor entre 7 y 8 (Bortle, 2001). Esto implica que sería muy difícil observar meteoros de magnitud superior a 5. Por otro lado, el método descrito aquí no se ve limitado por la calidad del cielo, lo que se limita es el número de meteoros observados.

Tabla 1: Resultados del análisis de los meteoros estudiados. La primera columna indica el nombre del archivo analizado, la segunda columna muestra el ajuste cuadrático a los datos, mientras que la tercera y cuarta columnas muestran la velocidad angular inicial del objeto así como su aceleración angular, ambas obtenidas a partir del ajuste cuadrático.

Descripción	Ecuación	Velocidad angular inicial (°/s)	Aceleración angular (°/s ²)
M 2018 10 24	$\theta = 0.15 + 9.58t + 4.24t^2$	9.58	8.48
M 2018 11 14	$\theta = 6.32t + 2.65t^2$	6.32	5.28
M 2018 11 30	$\theta = 0.06 + 6.06t + 0.69t^2$	6.06	1.38
M 2018 12 14	$\theta = 0.16 + 6.45t + 1.34t^2$	6.45	2.68
M 2019 01 10	$\theta = 0.16 + 18.05t + 12.09t^2$	18.05	24.18

4 Conclusiones

Es importante estudiar la interacción meteoroides-atmósfera a partir de la observación de sus meteoros pues nos da información sobre los objetos que colisionan con nuestro planeta. De dichas observaciones se pueden calcular trayectorias de los meteoroides, órbitas de pre-entrada y algunos parámetros físicos del objeto. Sin embargo, los estudios mencionados sólo son posibles si se cuenta con al menos dos estaciones, aunque cuatro sería el número mínimo recomendado. Dado que para este trabajo sólo se contó con una cámara, no es posible realizar todos los estudios mencionados, pero sí se pudieron realizar algunos análisis y familiarizarse con la cámara, el sistema de captura de meteoros, el software de manejo de imágenes y las ecuaciones de transformación de coordenadas.

A partir del trabajo realizado en esta investigación y de los resultados mostrados anteriormente, llegamos a las siguientes conclusiones:

1. Para poder localizar la traza del meteorito en la bóveda celeste, así como para realizar algunos cálculos cinemáticos y de la magnitud del meteorito, Stellarium, Free Video to JPG Converter, Fitswork4, e ImageDS9 es el conjunto de software adecuado para analizar los videos donde se capturaron meteoros. Los principales criterios para elegir este software fueron su disponibilidad y su fácil manejo.
2. Las transformaciones empleadas para pasar de coordenadas de imagen (x,y), a coordenadas ecuatoriales son bastantes adecuadas pues los errores porcentuales obtenidos al comparar las coordenadas reales de las estrellas de referencia con las coordenadas ecuatoriales obtenidas por las transformaciones fueron, en todos los casos, menores a 0.8 % en ascensión recta y a 6.5 % en declinación. En primera aproximación podríamos considerar que las coordenadas determinadas para la traza del meteorito mediante estas transformaciones tienen errores similares.
3. En todos los casos se determinaron relaciones cuadráticas entre la distancia angular y el tiempo con coeficientes de correlación mayores o iguales a 0.9974; lo cual implica que ambas variables están correlacionadas de esa manera en más de un 99 %.
4. Con base en las ecuaciones que relacionan distancia angular y tiempo se tiene que los objetos que ingresaron a la atmósfera de la Tierra lo hicieron con aceleraciones angulares de entre 1.38 y 24.18. Uno de los objetivos más importantes de este trabajo fue el de sentar las bases para la creación de

una red de observación de meteoros en Honduras. Dado que las condiciones de los países latino-americanos dificultan a los científicos participar en los grandes proyectos espaciales; proyectos de este tipo permiten hacer investigación en temas espaciales a relativamente bajo costo.

5 Referencias

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., y Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. experimental results and theoretical interpretation. *Science*, 208:1095–1108.
- Bortle, J. E. (2001). Introducing the bortle dark-sky scale. *Sky and Telescope*, 101(2):126–129.
- Cepilecha, Z., Borovička, J., Elford, W. G., Revelle, D. O., Hawkes, R. L., Porubčan, V., y Šimek, M. (1998). Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews*, 84:327–471.
- Cordero-Tercero, G., Maravilla, D., y Covarrubias-Saavedra, M. (2023). A new proposal of the term meteoroid. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 59:313–322.
- Cornejo-Patiño, S. (2017). Estudio de las trayectorias de meteoroides a través de la atmósfera terrestre.
- Dierks, J. (s.f.). Fitswork (v4). [Software de procesamiento de imágenes astronómicas]. https://www.fitswork.de/software/softw_en.php.
- Joye, W. (2019). SAOImage DS9 (v8.01). [Software]. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. <http://www.doi.org/10.5281/zenodo.2530958>.
- Longrich, N. R., Bhullar, B.-A. S., y Gauthier, J. A. (2012). Mass extinction of lizards and snakes at the cretaceous-paleogene boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(52):21396–21401.
- Marvin, U. (2006). Meteorites in history: an overview from the renaissance to the 20th century. En McCall, G. J. H., Bowden, A. J., y Howarth, R. J., (Eds.), *The history of meteoritics and key meteorite collections: Fireballs, falls and finds*, volumen 256 de *Special Publications*, pp. 15–71. Geological Society, London.
- Passey, Q. R. y Melosh, H. J. (1980). Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus*, 42(2):211–233.
- Plane, J. M. C. (2012). Cosmic dust in the earth's atmosphere. *Chemical Society Reviews*, 41(19):6507–6518.
- SonotaCo (2025). UFOCapture (v4.86). [Software de captura de meteoros]. http://www.sonotaco.com/soft/e_index.html.
- Trigo-Rodríguez, J. M., Rietmeijer, F. J. M., Llorca, J., y Janches, D., (Eds.) (2008). *Advances in Meteoroid and Meteor Science*. Springer.
- Yang, H.-J., Park, C., y Park, M.-H. (2005). Analysis of historical meteor and meteor shower records: Korea, china, and japan. *Icarus*, 175:215–225.
- Zotti, G., Hoffmann, S. M., Wolf, A., Chéreau, F., y Chéreau, G. (2021). The simulated sky: Stellarium for cultural astronomy research. *Journal of Skyscape Archaeology*, 6(2):221–258.

ARQUEOASTRONOMÍA Y ASTRONOMÍA CULTURAL

MENHIRES EN SUDAMÉRICA. MANIFESTACIÓN CULTURAL EN EL CENTRO DE LA ARGENTINA. EXPEDICIONES, ORIENTACIONES ASTRONÓMICAS Y CUIDADO PATRIMONIAL.

José Nicolás Balbi^{1,*}

¹Director del Museo del Observatorio de Física Cósmica de San Miguel, B1663 San Miguel, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 13-10-2025

Aceptado: 20-12-2025

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i2.22036>

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre la investigación arqueológica realizada en la zona de El Mollar, Provincia de Tucumán, República Argentina, donde se encuentran una cantidad de 114 Menhires datados al comienzo de la era común, correspondientes a la denominada Cultura Tafí, de los que originalmente no se conocen los motivos de su construcción y sobre los que estudiaremos sus probables ubicaciones, orientaciones astronómicas y significados culturales. Nuestro trabajo tiene la intención de actualizar los registros de estos lugares, catalogar las piezas existentes y sus marcas y dibujos, incluyendo los antecedentes de los archivos clásicos; dos expediciones ya realizadas y una serie de proyectos de trabajo en esta zona montañosa en busca de posibles ubicaciones originales y otras estructuras y un reconocimiento de campo exhaustivo con el uso de tecnologías modernas en los principales emplazamientos, para comprender más sobre la Cultura Tafí, sus creencias y la devoción que originó el tallado de los mencionados monumentos.

Palabras clave: Arqueología, Astronomía Cultural, Menhires, Argentina, Orientaciones Solares, Cultura Originaria.

ABSTRACT

The present work deals with archaeological research carried out in the El Mollar area, Province of Tucumán, Argentine Republic, where a total of 114 Menhirs dated to the beginning of the Common Era are found, corresponding to the so-called Tafí Culture. The original reasons for their construction are unknown, and we will study their probable locations, astronomical orientations, and cultural meanings. Our work intends to update the records of these sites, catalog the existing pieces and their marks and drawings, including the background from classical archives; two expeditions already carried out and a series of work projects in this mountainous area in search of possible original locations and other structures, and an exhaustive field survey using modern technologies at the main sites, in order to understand more about the Tafí Culture, their beliefs, and the devotion that gave rise to the carving of the aforementioned monuments.

Keywords: Archaeology, Cultural Astronomy, Menhirs, Argentina, Solar Orientations, Indigenous Culture.

*nicolasbalbi@yahoo.com.  <https://orcid.org/0009-0005-5750-9742>

1 Introducción

Nuestro trabajo consta de una serie de expediciones que estamos realizando en Taí del Valle, Provincia de Tucumán Argentina, en base a documentación de varias expediciones arqueológicas realizadas entre finales del Siglo XIX y principios del siguiente, para estudiar los sitios donde fueron emplazados una gran cantidad de monumentos de piedra. Luego intentaremos ubicar sus orientaciones en relación a los astros y darles a éstas un sentido cultural. ¿Son estos menhires Antiguos? Si, fueron datados por varios autores en aproximadamente dos mil años de antigüedad a principios de la era común ([Chambeaud, 2007](#)). ¿Fueron recientemente descubiertos? No, los occidentales los conocemos desde mitad del siglo XIX. ¿Se han estudiado previamente? Si, existen trabajos realizados y publicados por reconocidos profesionales de la Arqueología. Entonces, ¿De qué trata nuestra investigación?: Los autores que veremos en este trabajo han realizado aproximaciones de Arqueología Material, descriptivas, de clasificación morfológica de los hallazgos, por división o contacto de culturas y también semióticas. Nuestra intención es la de explorar estos trabajos desde distintos puntos de vista, mencionar las conclusiones a que se arribaron con los métodos de cada época, y darles un sentido cultural, ceremonial y simbólico mediante la metodología actual de la Arqueología, la Antropología y la Astronomía Cultural. También es una declaración en pos de un llamado de alerta para el cuidado patrimonial. Se da la extraña circunstancia de que los Menhires fueron, por distintos motivos que vamos a tratar, movidos varias veces de sus posiciones originales. El estudio exige recurrir a anotaciones, mapas dibujados a mano y relatos que nos indicarían en algunos casos sus orientaciones originales. Asimismo, el estudio global de los conjuntos y la organización de más de un centenar de megalitos de una cultura de dos milenios requieren nuevas expediciones y relevamientos. En esta primera parte vamos a realizar una aproximación a nuestro trabajo y plantear las teorías de la orientación de los mismos.



Figura 1: Muestra de algunos menhires presentes en la zona de El Mollar, Argentina, fotografía del autor junto a uno de los monumentos, vista general del sitio arqueológico mostrando la disposición general de los menhires (Créditos: autor)

1.1 Antecedentes Históricos sobre la dominación política en la zona en la Argentina de 1880

La primera mención de uno de estos menhires data de 1861. La zona de referencia se conocía como “Territorios Indígenas”, ya que las áreas ocupadas por los países independizados del sistema colonial español estaban circunscriptas a las ciudades principales, sus caminos y algunos campos. En el caso de Argentina, los caminos que llevan desde la Cordillera de los Andes a Buenos Aires y desde ésta Capital hacia el Norte, Tucumán, Salta y Asunción. El resto de los territorios serían unificados mediante una serie de campañas militares y la organización de una estructura Nacional en las épocas de las llamadas “Presidencias Históricas”, entre (1861–1868 Bartolomé Mitre) (1868–1874 Domingo F. Sarmiento) y (1874–1880 Nicolás Avellaneda) y la consolidación de la Nación Argentina (1880–1886 Julio Argentino Roca). Las acciones que llevaron a esta formación Nacional, la derrota de los pueblos indígenas que se habitaban estos territorios

son todavía motivo de controversia aunque no tienen relación con el espíritu del presente trabajo.

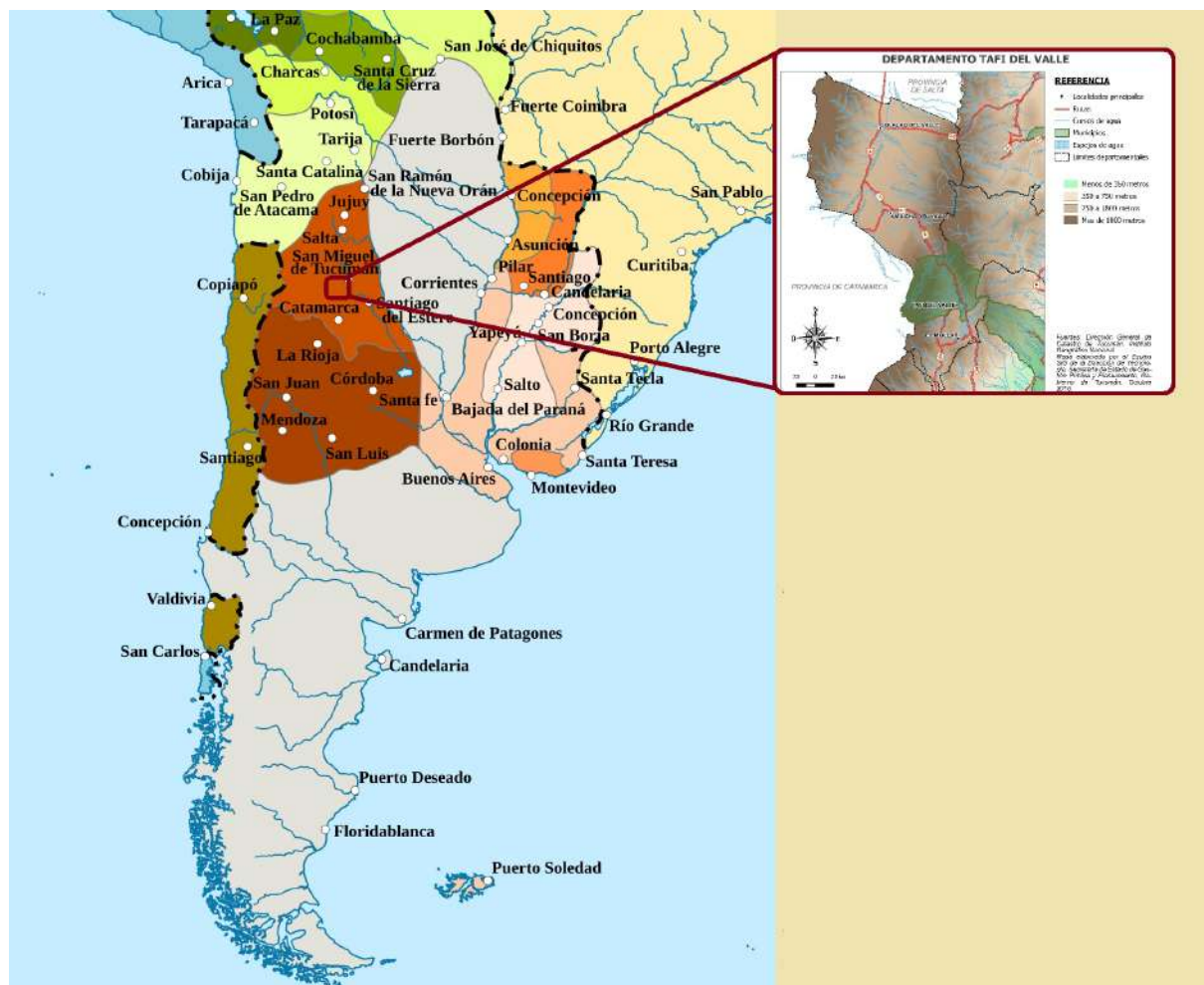
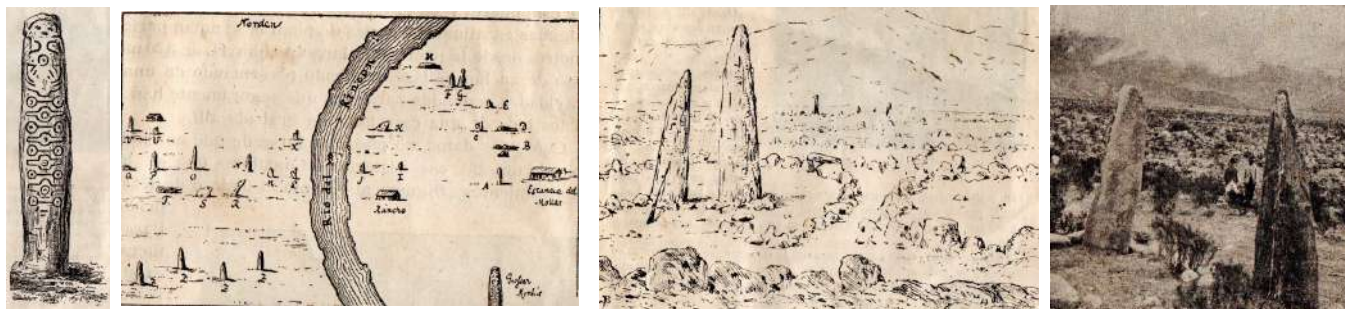


Figura 2: Mapa de Sur Sudamérica con las principales ciudades y puertos del s.XIX. Detalle: Zona de Taí del Valle, actual provincia de Tucumán, Argentina. Fuente: IGN ([Archivo General de la Nación Argentina, 1922](#)).

La primera mención a la existencia de monumentos en la zona del Valle de Taí aparece en la obra del naturalista alemán Germán Burmeister (1807-1892), quien en su “Viaje a los Estados del Plata” (1861), relata que un compatriota alemán le mencionó la existencia de dos piedras de “tres y dos tercios de varas de largo por media vara de ancho cubiertas de signos, una de ellas en pie” en las cercanías del complejo Jesuita de La Banda ([Burmeister, 1861](#)). Posteriormente el Valle del Taí sería parte de la investigación de Juan Bautista Ambrosetti, etnógrafo, naturalista y arqueólogo argentino, quien se trasladaría al lugar en 1896 y al año siguiente, publicaría en el Boletín del Instituto Geográfico Argentino un artículo mencionando el hallazgo del Menhir principal (El que posteriormente llevaría su nombre, de 3,1 metros de alto por 0,5 de ancho) y posteriormente otros, con dibujos y el hecho de que uno de ellos estaba caído de lado. Juan Bautista Ambrosetti sería uno de los pioneros que sentaría las bases de la Antropología argentina; el Museo Etnográfico de la Ciudad de Buenos Aires lleva su nombre. Uno de los pobladores le indicó que había sido volteado por unos “exploradores franceses que excavaron la base en busca de tesoros”. Ambrosetti indica en sus anotaciones originales que debido a la posición de la excavación, el menhir estaría enterrado unos 30 centímetros y su cara esculpida estaría mirando hacia el Sur, de frente al cerro

Ñuñorco ([Academia Nacional de la Historia, 1897](#); [Ambrosetti, 1897](#)). El cerro es denominado “Panaquao” en idioma Kakan por sus habitantes locales. En 1915 este menhir en particular fue trasladado a la ciudad de Tucumán por orden del Gobernador Ernesto Padilla, como decoración para las festividades del centenario de la Independencia de Argentina ([Chambeaud, 2007](#)). Luego, en 1977, mediante la excusa de su preservación fue trasladado a la colina denominada “El pelado”, cerca del dique La Angostura ([Bartl y Videla, 2023](#)) y luego a la Reserva de El Mollar ([Paez de la Torre, 2014](#)), donde se formaría un parque con una cantidad de Menhires que fueron removidos desde distintas ubicaciones en la zona.



(a) Dibujos y fotografía realizados por [Ambrosetti \(1897\)](#) mostrando el detalle de uno de los menhires y la distribución de las estructuras en la zona.



(b) Ambrosetti y sus acompañantes durante la visita al sitio.

Figura 3: Imágenes obtenidas del libro de [Ambrosetti \(1897\)](#) en relación al primer viaje de exploración a la zona que se documentó.

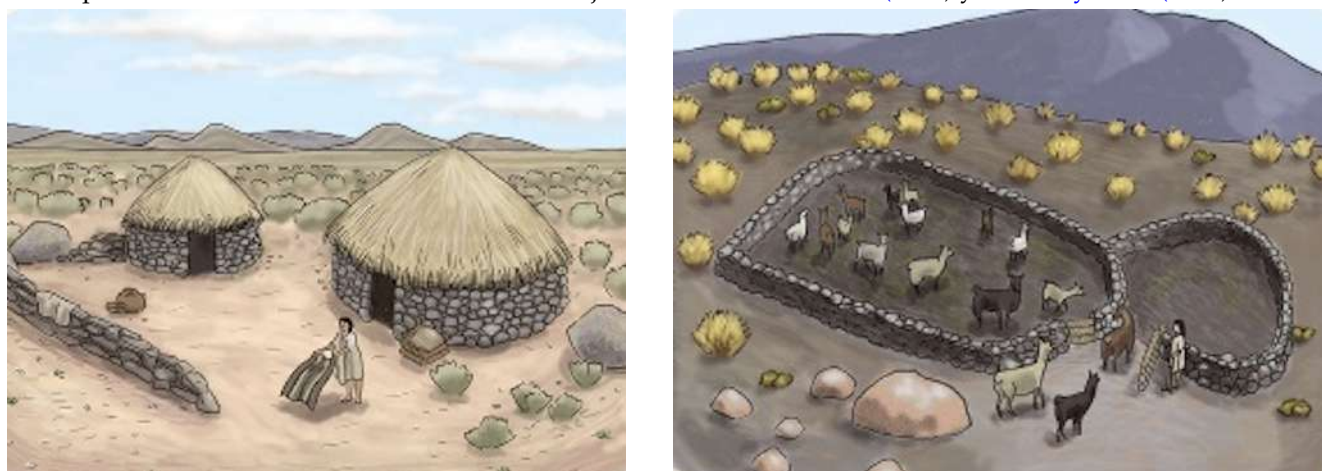
1.2 La presencia de la Cultura Tafí en la región

El lugar de estudio es básicamente un sistema de valles y montañas. Se diferencia de la geografía del entorno y no tiene cambios geográficos sustanciales hasta la construcción del dique La Angostura en 1979. De las expediciones y excavaciones que realizaron Rex González y Núñez Regueiro en los años 60's sugieren que en vista de los elementos arqueológicos obtenidos, el área de ocupación al sur sería la más temprana ([Gonzalez y Nuñez Regeiro, 1960](#)). En esta zona se desarrollaría lo que se da en llamar la fase Angostura ó Tafí 1, cuyo centro se encuentra en la excavación primaria de Rex González en El Mollar, y cuyos elementos se caracterizan por cerámicas toscas, comunes, algunas de ellas con un baño de monocromo rojo y algunos detalles bruñidos. Se deduce por la existencia de algunas estructuras de

pedra el desarrollo de terrazas para el cultivo de maíz y ya que fueron encontradas puntas de flecha se supone la actividad de caza como medio de sustento suplementario. Los habitantes se organizarían en pequeñas aldeas lo que surge de la organización de las piedras halladas y es la época en que entendemos son originarios los Menhires y una serie de estructuras habitacionales. Los datos son del trabajo de [Núñez Regueiro y Tarragó \(1972\)](#) que propusieron diferenciar dicha cultura con una segunda fase denominada Carapunco (Tafí II), que presenta una mayor variedad de cerámicos, urnas funerarias y algunos elementos intrusivos de culturas tempranas como Candelaria y Condorhuasi. Se supone que la cerámica decorada es claramente incorporada por contacto con otras entidades culturales ([Salazar, 2007](#)). Por la composición de las piezas cerámicas, se deduce que la mayoría de las mismas fueron cocinadas mediante la técnica del “rescoldo”, que les da una menor dureza y duración ([Balbi y Cristóforo, 2021](#)).



(a) Fotografía de uno de los sectores trabajados en la zona arqueológica (denominada La Bolsa I) y plano obtenido de una de las áreas de trabajo. Obtenidos de [Salazar \(2007\)](#) y [Salazar y Salvi \(2016\)](#).



(b) Representaciones artísticas del estilo de vida de los antiguos habitantes Tafíes del sitio (Crédito: Daniel Oregioni).

Figura 4: Restos arqueológicos de la antigua civilización Tafí e interpretaciones artísticas de cómo pudo ser la vida de sus habitantes.

2 Los Menhires

En cuanto a las estructuras en sí, se tratan de símbolos fálicos o quizás itifálicos, y de todos modos se acepta su función ceremonial o de protección e incluso un posible culto a la fertilidad. Este tipo de símbolos pueden asociarse a los cultivos (Bourdieu, 2007). El material de construcción es de esquistos (del griego *σχιστός*, 'escindido') son rocas que se caracterizan por su composición en láminas que permiten su fragmentación en capas delgadas) y granito, material que puede hallarse en un radio máximo de 3 kilómetros (Ambrosetti, 1897) de los emplazamientos, el mayor mide 3 metros de largo y su peso es de unas cuatro toneladas. Tienen esculpidos motivos antropomorfos, zoomorfos y geométricos sin un aparente orden o relación, aunque los mismos pueden clasificarse de diferentes maneras tal como se ha ensayado en distintos trabajos (Bartl y Videla, 2023), tomándose en cuenta los lisos o esculpidos, las formas o el motivo, aunque ninguno de estos autores ha arriesgado una correlación ceremonial o religiosa de algún tipo. Para recapitular la línea de tiempo, la primer noticia de los Menhires es de 1861 y Ambrosetti su informe será publicado en 1897. Lafone Quevedo hizo un informe complementario y Bruch hace una descripción y dibujos de, los monolitos con fotografías en 1911. Schreiter hizo planos y tomó nuevas fotografías en 1928 (Schreiter, 1928); Rex González y Nuñez Regeiro excavaron en El Mollar y en los kilómetros 64-65 y 71 (Bartl y Videla, 2023) y aportaron la datación con métodos radio carbónicos en 1960, datándolos entre el 200Aec y 800Ec (Salazar, 2007), en expediciones realizadas por el Instituto de Arqueología de la Universidad de Córdoba. Es en este año, cuando Rex González, propone crear in situ un parque arqueológico alrededor de una serie circular de piedras, que se encontraban, según él mismo indica, rodeado de menhires (Gonzalez y Nuñez Regeiro, 1960). Usamos la palabra celta Menhir, por ser la más común para designar estos monumentos, pero localmente se prefiere el nombre "Huanca" que indicaría en idioma quechua su función de protección.

2.1 Principales menhires

Muchos de estos menhires tienen nombre, haré una breve descripción de los más destacados:

- Menhir Ambrosetti: es el más conocido por su historia, por haber sido el primero y por sus grabados. Presenta una representación antropomorfa y un atuendo;
- Menhir Bruch: Con representaciones antropomorfas y geométricas;
- Menhir El Churqueño: Llamado de este modo a causa del lugar donde fue encontrado. ; Menhir El Rincón: Posee la representación de un rostro. ;
- Menhir El Padre: ; sin marcas ni características especiales
- Menhir N° 66: Presenta representaciones icónicas. ;
- Menhir Felino 1: Puede verse una representación zoomorfa en el extremo superior, marcas y un atractor icónico volumétrico (Las orejas), El Felino es un ícono muy utilizado en las representaciones andinas (García Azcarate, 2000) Hay autores que proponen una relación entre las representaciones de los felinos y el Punchao, que sería un equivalente al día o el sol (Laguens, 2007) y en algunos casos los vientos (Kendall, 1989). ;
- Menhir Geométrico: Presenta una serie de atractores que fueron relacionados con las operaciones cognitivas de los realizadores.;
- Menhires HC1 y HC2: sin marcas ni características especiales ;

- Menhir “La Lápida”: Por su forma de lápida y uno de los más conocidos ya que el diseño de su cara es uno de los motivos iconográficos más utilizados para la difusión turística y del museo. ;
- Menhir “La Vieja” ; Menhir N° 23 El Falo: ; Menhires Prismáticos 1 y 2: ; no presentan motivos especiales ni marcas que comentar;
- Menhir Prismático Grabado: con motivos geométricos ;
- Menhir Rio Blanco: Distintos tipos de grabados, y una combinación de diseños complementarios. Hay diseños en espiral combinados con otros encontrados en menhires sin estas combinaciones;
- Menhir Zabaleta Pueyrredón: Con representaciones antropomórficas similares a “El Rincón”.

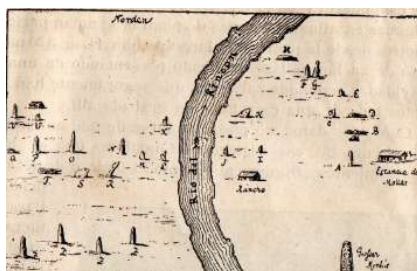


Figura 5: Nombres de algunos de los menhires más importantes.

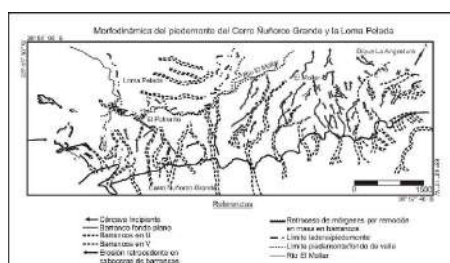
2.2 Herramientas y Orientaciones

Sabemos que si bien en el segundo milenio los indígenas andinos lograron la fundición de metales, no poseían estas herramientas en la época de la confección de los menhires. El trabajo de erosión y tallado se hacía con piedras más duras y se frotaba las superficies con arena. Los menhires tienen en su mayoría una sola cara tallada, y se conservan los escritos originales del hallazgo de al menos cuatro de ellos en los que se encuentran comentarios de los expedicionarios que indican la suposición de que los mismos

miraban hacia el este y se encontraban colocados junto al resto, de lado, hacia el oeste del Río del Rincón ([Academia Nacional de la Historia, 1897](#); [Ambrosetti, 1897](#)). Posteriormente Rex González indicaría que se hallaban a ambos lados del mismo río. Asimismo el equipo que inició las restauraciones químicas en prevención al ataque de líquenes y la realización de distintas tareas de cuidados en 2012 le atribuían estar no solo alineados sino mirando hacia el Este ([Bahmondez Pietro, 2011](#)).



(a) Dibujo de Ambrosetti donde se aprecia que los menhires en la parte inferior izquierda parecen tener una orientación Este-Oeste. El Norte está hacia arriba de la imagen.



(b) Morfodinámica del piedemonte del cerro Ñuñurco Grande y la Loma Pelada



(c) Localización del Cerro Ñuñurco Grande en relación con el sitio arqueológico cerca de El Mollar. Imagen obtenida de Google Maps.

Figura 6: Descripción de las orientaciones de los menhires en el sitio y su relación con la geografía del lugar.

No se sabe a ciencia cierta cuántos menhires fueron originalmente erigidos. Siempre existieron rumores sobre el robo o la venta de los mismos. Un estudio actual confirma la correspondencia en 1922 del arqueólogo Rudolf Schreiter a quien anteriormente citamos, describiendo la cultura del Valle, el hallazgo de los menhires y la posibilidad de la venta de los mismos al “Museo del mundo” de la ciudad de Viena ([Chambeaud, 2007](#)). Un trabajo de 2007 ([Palamarczuk y Grimoldi, 2016](#)) descubrió esta correspondencia que agregó muchos elementos descriptivos a los ya conocidos y confirmó lo que hasta entonces eran rumores. Asimismo, las noticias del robo de Menhires y su comercialización son comunes en la zona y entre los habitantes; tantos han sido los movimientos que las sospechas son comunes, incluso más allá de la pérdida patrimonial, las relacionadas a la realización de ritos y ceremonias con los monumentos sustraídos. Oportunamente, los traslados fueron justificados en cuanto que según el discurso oficial, se evitarían los robos y vandalismos ([365Argentina, 2022](#)). Veamos de todos modos una breve línea de tiempo: En un principio el informe de la expedición de Ambrosetti en 1961, ampliado por, Rex González en 1987, quien, luego de sus hallazgos, había realizado la propuesta de la creación de un Parque Arqueológico, con la idea de preservar los monumentos cuyos emplazamientos estaban siendo estudiados para utilizarlos, tal como ha ocurrido en el transcurso de toda la historia, para construcciones particulares, etc. En 1965 se proclama la Ley 3228 que crea el parque y la Ley 3363 que Crea una Dirección de Turismo. De todos modos, el Parque Los Menhires se crea en 1977 causando el mayor daño ya que en esta época es cuando se ordena a los pobladores la entrega de los menhires que se encuentren en sus propiedades y su traslado, que en muchos casos se realiza por la fuerza y la reubicación de los que se conocían. El traslado se realizó por orden de Antonio Domingo Bussi, Gobernador Militar y Comandante de la V Brigada de Infantería. Debemos tener en cuenta que unos años antes, en 1975 y durante el gobierno democrático se había realizado en la Provincia el Operativo Independencia del cual fue su Comandante. Presagio de otros tipos similares de combates en toda Sudamérica, se trató de una guerra al estilo, con armas, bombardeos con defoliadores y tácticas de Vietnam. Cuatro años después, en 1979, se completa el Dique La Angostura ([Adler, 2023](#))

con lo que se culmina el cambio geográfico que se mantiene hasta la actualidad, aunque nada indica que en el área del lago hayan quedado piezas sumergidas. Rex González se quejó amargamente del trato de los Menhires en su conocido trabajo “Tiestos Dispersos” ([Adler, 2023](#)). Hacia el año 2005, una nueva ley de preservación Ley 7535 crearía una comisión de preservación del patrimonio, en la que el Centro de Capacitación e Investigación Indígena (INCAI) propone la construcción de un Museo y Observatorio Astronómico en el sitio de Casas Viejas, lugar de la excavación original de Rex González ([Chambeaud, 2007](#)), donde las piezas deberían ser nuevamente trasladadas y ubicadas. Se tiene en cuenta que los menhires formaban un conjunto con las estructuras circulares y se toma en cuenta sus posibilidades de orientación ceremonial y astronómica ([Acuto, 2007](#)).



(a) Trabajos de reubicación de los menhires de Taí (Tomado del Inventario 51832 del Archivo General de la Nación Argentina.)



(b) Fotografía de la Reserva Arqueológica en el año 2022. Fotografía del autor.

Figura 7: Muestra de cómo los menhires adquirieron su distribución actual.

3 Propuesta de ubicación original

Este tema es el motor de nuestro trabajo y puedo ilustrarlo con los distintos mapas, estudios y anotaciones en los informes de arqueología, realizados a través del tiempo y con metodologías diversas. Si bien para especular con la ubicación de los menhires individualmente debemos confiar en los relatos ya mencionados, el estudio de sus conjuntos presenta una visión ordenada, que se mantiene desde el informe

original de Ambrosetti. En nuestro estudio, también tomamos en cuenta la orografía del lugar, que afecta considerablemente las anotaciones de la salida del sol y la posibilidad de una alineación al equinoccio medio temporal, que ya fue calculada mediante software en diferentes lugares y pendiente de corroborar en el campo. Por ejemplo, en las imágenes podemos ver el conjunto excavado en 1960, diagramado por Rex González y de donde proceden siete de los menhires de estudio; el Río del Rincón y el cerro Ñuñorco grande (de 3200 msnm.) que se sitúan al Este y forman un conjunto que si bien no denota la complejidad de marcaciones calendáricas, indican un culto o al menos una señal hacia el lugar de la salida del sol. Ya nos habíamos referido a la religiosidad de las culturas andinas y su devoción hacia el sol al que consideraban y consideran su “protector”. En las imágenes se agregan mapas y dibujos de esta primera fase de la investigación: El sitio de Casas Viejas (Excavación de Rex González), zona de Potrerillos y vistas del cerro Ñuñorco y el sitio de El Rincón (Chambeaud, 2007), también hogar de asentamientos y hallazgos arqueológicos.



Figura 8: Proyecto de Ocumen y el Ente Cultural para el sitio

Pueden encontrarse exhibidos al público una gran cantidad de elementos característicos de las culturas Taí I y II en los museos locales, principalmente en el Museo de la antigua estancia Jesuítica donde se hallan morteros y elementos de la misma cultura, tales como vasijas, puntas de flecha y diferentes objetos contruidos principalmente en cerámica. Muchos museos (De la Universidad Nacional de Catamarca, de la Universidad Nacional del Tucumán, Etnográfico de Buenos Aires, de Ciencias Naturales de La Plata en Buenos Aires) tienen colecciones con distintos elementos pertenecientes a esta cultura, en su mayoría cerámicos. Se intuye de los hallazgos, tanto arqueológicos como estructurales, un pueblo con una organización y trabajo comunitario, posibilidades ceremoniales y creencias religiosas. Algunos autores centran sus trabajos en la vida comunitaria de estos pueblos, que deben organizarse a partir del segundo milenio (Salazar y Salvi, 2016) y en algunos casos llegan a ser subsidiarios del posterior Imperio Inka (Nastri, 2020).

3.1 Situación Actual

El parque donde fueron colocados la mayoría de los Menhires se denomina actualmente “Reserva Arqueológica Los Menhires”, y está situado en la localidad de El Mollar, 17 kilómetros al este de Taí del

Valle, Provincia de Tucumán. El lugar es accesible por la Ruta Provincial 307 y ubicado aproximadamente en $26^{\circ}59'26''S$, $65^{\circ}42'38''O$; el dato fue calculado en el campo con Garmin e-trex10 y software Geohack. La protección de las piezas es casi nula, tratándose de una exposición al aire libre en el centro de la pequeña localidad de El Mollar, donde se ubican 114 menhires, rescatados de la Loma de la Angostura. Hecho que prueba, que estaban todos los relevados por el Instituto de Arqueología de la UNT. Asimismo, se recuperaron: uno de la Plaza de Monteros, dos del Cementerio de Tafí del Valle, cuatro de la Plaza y tres de la Plazoleta de El Mollar. De manera que la Reserva fue conformada por 123 piezas. También, se encontró en la Loma un pequeño menhir que no figuraba en el relevamiento, incluso no era conocido por los arqueólogos; y por su pequeña dimensión (70 cm), fue reubicado en guarda en el Museo Histórico Provincial (Chambeaud, 2007).

La zona de Tafí del Valle, a partir del crecimiento urbano a finales del Siglo XX, ocuparon parte de los sitios donde fueron encontrados los menhires conformando la ciudad de El Mollar, al sur del lago. No obstante, debemos escuchar los relatos de los pobladores actuales, muchos de ellos originarios, que cuentan las leyendas donde los Huancas protegen a los pobladores, les otorgan buenas cosechas (que también son parte de los ritos de fertilidad) y actúan como protectores en algún sentido. De estos relatos obtuvimos la información de que uno de los lugares de protección se encontraba en una ciudadela cerca del río de Amaicha, en la zona conocida como Amaicha del Valle, que se trata de una de las localidades cercanas. Hemos explorado el sitio, que a primera vista contiene características andinas, tales como la teatralidad en la posición en el lugar de construcción, Cuadrangular y con piedras del mismo tamaño, Puntos Cardinales representados en el paisaje o con construcciones, y la existencia de un lugar para su uso ceremonial (Hyslop, 1990). He solicitado los permisos de excavación en el lugar y espero sea parte de la próxima entrega de este trabajo.

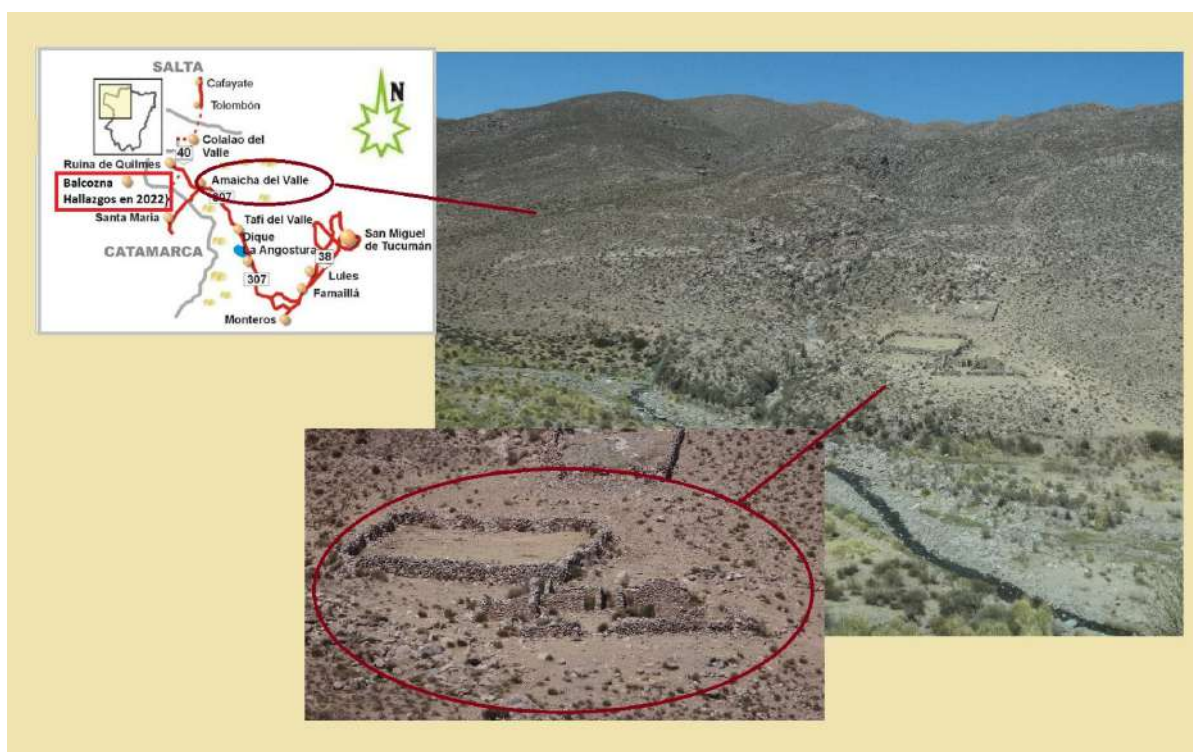


Figura 9: Sitio de Amaicha del Valle, siguiente lugar a estudiar (fotografías del autor).

Breve reseña del trabajo en la Comunidad Ingamana: Tal como mencionamos al comienzo, nuestro acercamiento a las comunidades indígenas de la zona fueron inicialmente por motivos culturales y no especialmente relacionados con los emplazamientos de los menhires. Sin embargo me parece apropiado hacer un aparte para referirnos brevemente al trabajo con la comunidad Ingamana que se consideran descendientes diaguitas y de la comunidad de los Quilmes, algunos de los cuales se encuentran en el consejo ya que se consideran culturalmente cercanos, e incluso comparten el uso de la lengua Kakan, utilizada en todo el centro de la planicie argentina por todos los pueblos que se consideran diaguitas. El trabajo en el lugar era el de ampliar el actual diccionario y los estudios realizados a la fecha con el idioma Kakan, entrevistando a algunos de los miembros de la comunidad más longevos. Fueron ellos los que propusieron el uso del vocablo quechua “Huanca” para designar a los menhires, y otros estudios arqueológicos, principalmente en la zona de San José, Catamarca, indican la alineación de estructuras hacia la salida del sol, a quien ellos consideran su protector, incluso en relatos transmitidos verbalmente. Entre las muchas contradicciones culturales que pueden observarse, tales como el uso de símbolos adjudicados actualmente a la cultura Inka, podemos mencionar la posible influencia Inka posterior (hacia 1400) aunque su rechazo a la antigua relación política de sometimiento a este Imperio se encuentra determinado desde el nombre mismo de la Comunidad: Ingamana, que en idioma Kakan, indica “rechazo o negación hacia el Inka”.

4 Conclusiones

En esta primera parte del trabajo, nos hemos propuesto realizar una investigación sobre los antecedentes de los Menhires en el Valle del Tafí y de las culturas que los construyeron. Hay muchos trabajos en este sentido, aunque la intención es buscar la orientación de los monumentos en los sitios originales de acuerdo a los datos que son posibles recopilar de las anotaciones y dibujos de las primeras expediciones. El acceso a estos lugares hoy en día es difícil porque los caminos no se acercan a esas zonas y por los cambios geográficos son muy profundos, por ejemplo el hecho de que el caudal del río principal donde se hicieron las excavaciones de 1961 hoy es menor y afectado por la construcción del dique. Esta publicación es una aproximación a la zona de los menhires e intenta ser el inicio de nuevas expediciones a la zona montañosa, que constituye lugares de difícil acceso. En los dibujos del reporte original, cuyos dibujos originales se agregan en la Figura 3, puede notarse una alineación de los emplazamientos en dirección Este – Oeste, que podrían tener una relación calendárica, aunque para determinar las medidas con exactitud, debería realizarse una expedición al lugar y tomar las medidas apropiadas. Igualmente la misma situación aparece en el hallazgo del Menhir original “Ambrosetti”, del cual el autor indica que se hallaba con la cara al Oeste, aunque había sido desenterrado anteriormente, posiblemente en busca de tesoros. Es de notar, y tal como se reproduce en el informe, que si bien en esta primera expedición no he realizado las difíciles medidas de campo a causa del complejo acceso a las distintas zonas para ser concluyente en cuanto al uso calendárico de estos conjuntos, es notable que la cuestión retorne con cada visita a los distintos sitios que se estudian. Sea cual fuere el resultado final, es notable que los menhires no fueron colocados en forma aleatoria sino que tienen un sentido evidentemente cultural. Estos datos me animaron a continuar la tarea de explorar los sitios y determinar, como hemos hecho hace mucho tiempo, que las estructuras de la arqueología material están profundamente relacionadas con su entorno: el cielo y el paisaje.

5 Agradecimientos

Agradecemos a los miembros de las distintas comunidades indígenas que colaboraron en la realización de este trabajo y en los planes que realizaron para las próximas expediciones: Ingamanas (Catamarca), Quilmes (Tucuman), Diaguitas del Quimivil (Catamarca), y a los guías del Centro Cultural de El Mollar.

A Alejandro Barelli por su trabajo en la expedición de 2022 y a Eduardo Bufalino por su colaboración en la búsqueda de documentación y análisis de archivos. A Priscilla Faulhaber y Danielle Alexander por su colaboración en las traducciones.

6 Referencias

- 365Argentina (2022). Noticias de el mollar tucumán. Noticias periodísticas varias de dominio público en red. Disponible en: http://www.365argentina.com/tucuman/el_mollar/informacion_general.php [consultado: 2022-02].
- Academia Nacional de la Historia (1897). Boletín del instituto geográfico argentino. Año 1897, Tomo XVIII, págs. 105-172.
- Acuto, F. A. (2007). Fragmentación vs. integración comunal. *Revista de Estudios Atacameños*, 34:71–95. en Repensando el Período Tardío del Noroeste Argentino.
- Adler, F. (2023). Antecedentes históricos del dique la angostura. en Reflexiones ante el hecho del vaciado del Dique.
- Ambrosetti, J. B. (1897). Los monumentos megalíticos del valle de tafi. En *Boletín del Instituto Geográfico Argentino*, volumen XVIII, pp. 105–114. Buenos Aires.
- Archivo General de la Nación Argentina (1922). Tafi del valle, menhires (archivo fotográfico). Consultado en mayo de 2022. Imágenes 01, Caja número 3035 Inventario 228996/1922.
- Bahmondez Pietro, M. (2011). Los 124 menhires de tafi del valle subsisten muy dañados por la naturaleza y por el hombre.
- Balbi, J. N. y Cristóforo, I. (2021). Técnicas cerámicas. *Los Inkas del sur del Continente Americano, revista de la facultad de Ciencias de la UNAH*, 13.
- Bartl, B. y Videla, M. V. (2023). Los menhires como imágenes materiales visuales.
- Bourdieu, P. (2007). *El sentido práctico*. Editorial Siglo XXI, Buenos Aires.
- Burmeister, C. G. C. (1861). *Viaje por los Estados del Plata*, volumen 1. Buenos Aires, primera edición. Biblioteca de la Academia Nacional de la Historia (Argentina), signatura C 24-04-28/29. Consultado en Mayo de 2022.
- Chambeaud, A. M. (2007). Políticas patrimoniales en los menhires del tafi. *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales de la Universidad de Jujuy*, (32).
- García Azcarate, J. (2000). Símbolos, piedras y espacios: una experiencia semiológica. En Podestá y Hoyos, (Eds.), *Arte en las rocas. Arte Rupestre, Menhires y Piedras de Colores en Argentina*, pp. 15–44. Buenos Aires.
- Gonzalez, A. R. y Nuñez Regeiro, V. (1960). Preliminary report on archaeological research in tafi del valle, nw: Argentina. En *Akten des 34 Internationalen Amerikanisten kongress*, pp. 18–25, Viena.
- Hyslop, J. (1990). *Inka Settlement Planning*. University of Texas Press, Austin.
- Kendall, A. (1989). Everyday life of the incas. En *Incas and the People*, p. 133. Dorset Press, New York.

- Laguens, A. (2007). Contextos materiales de desigualdad social en el valle de ambato, catamarca, argentina, entre los siglos vii y x d.c. *Revista Española de Antropología Americana*, 37(1):27–49.
- Nastri, J. (2020). Valles del noa siglos xvi a xvii. En *La arquitectura aborigen de la piedra y la Montaña*, pp. 141–163. Editorial de la Universidad de Buenos Aires.
- Núñez Regueiro, V. y Tarragó, M. (1972). Evaluación de datos arqueológicos: ejemplos de aculturación. *Estudios de Arqueología*, 1:36–39.
- Paez de la Torre, C. (2014). La odisea del menhir más famoso. *La Gaceta de Tucumán*. Artículo periodístico.
- Palamarczuk, V. y Grimoldi, M. S. (2016). Un manuscrito inédito de rudolf schreiter sobre arqueología del noroeste argentino. relaciones entre coleccionismo e investigación científica a comienzos del siglo xx. *Revista del Museo de Antropología J.P. Ambrosetti*.
- Salazar, J. (2007). Reproducción social doméstica y asentamientos residenciales entre el 200 y 800 d.c. en el valle de tafí, provincia de tucumán. *Comechingonia virtual, Revista Electrónica de Arqueología*, (1):52–66.
- Salazar, J. y Salvi, V. (2016). Producción y reproducción social durante el primer milenio en el valle del tafí. En *Crónicas materiales precolombinas*, pp. 81–106. Sociedad Argentina de Antropología, Buenos Aires.
- Schreiter, R. (1928). Monumentos megalíticos y pictográficos de los altos valles de la provincia de tucumán. *Boletín del Museo de Historia Natural*, 2(1):1–9.

CIENCIAS AERONÁUTICAS

TAXONOMÍA DE AMENAZAS EN AVSEC: DEL DAÑO AL DELITO

M.E. Roberto Sánchez Escobar^{1,*}

¹Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE). Av. Tecnológico S/N, Valle de Anahuac,
55210 Ecatepec de Morelos, Méx., México

Recibido: 17/septiembre/2025

Aceptado: 25/noviembre/2025

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i2.22039>

RESUMEN

La seguridad de la aviación civil (AVSEC) constituye un componente esencial en la gestión integral del transporte aéreo para la protección de personas, aeronaves e instalaciones aeroportuarias contra actos de interferencia ilícita y amenazas emergentes. En este contexto, surge la propuesta de una taxonomía de orden que permita clasificar aquellos eventos que producen daño de manera negligente y los que constituyen delitos intencionales, no solo por su valor académico y jurídico, sino por el impacto directo en la toma de decisiones y asignación de recursos en la gestión del riesgo. Además, la adopción de un enfoque disruptivo en la conceptualización y clasificación de las amenazas permite cuestionar y actualizar los marcos regulatorios existentes para garantizar su pertinencia frente a escenarios emergentes, como el uso indebido de aeronaves no tripuladas (drones), ciberataques o amenazas híbridas. A pesar de los avances normativos y técnicos en seguridad, gran parte de la literatura académica y técnica han tendido a clasificar los incidentes bajo categorías genéricas. Esta falta de diferenciación limita el diseño de políticas públicas efectivas, la correcta asignación de responsabilidades jurídicas y la priorización de recursos en la gestión del riesgo. En respuesta a esta brecha, el presente artículo propone un marco conceptual innovador basado en la elaboración de una taxonomía de amenazas que permita establecer criterios para distinguir sistemáticamente las conductas que configuran delitos y fortalecer la gestión del riesgo mediante una herramienta de análisis que apoye la actualización normativa, promueva la resiliencia institucional y fomente la implementación de políticas fundamentadas en evidencia científica.

Palabras clave: Taxonomía; Delito; Clasificación de las amenazas; Ciberataques; Amenazas híbridas.

ABSTRACT

Civil aviation security (AVSEC) is an essential component of comprehensive air transport management for the protection of people, aircraft, and airport facilities against acts of unlawful interference and emerging threats. In this context, a taxonomy of order emerges that allows for the classification of events that cause negligent harm and those that constitute intentional crimes, not only for its academic and legal value, but also for its direct impact on decision-making and resource allocation in risk management. Furthermore, adopting a disruptive approach to the conceptualization and classification of threats allows for the questioning and updating of existing regulatory frameworks to ensure their relevance in the face of emerging scenarios, such as the misuse of unmanned aircraft (drones), cyberattacks, or hybrid threats. Despite regulatory and technical advances in security, much of the academic and technical literature has tended to classify incidents under generic categories. This lack of differentiation limits the design of effective public policies, the proper assignment of legal responsibilities, and the prioritization of resources in risk management. In response to this gap, this article proposes

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

an innovative conceptual framework based on the development of a threat taxonomy that establishes criteria for systematically distinguishing behaviors that constitute crimes and strengthens risk management through an analytical tool that supports regulatory updates, promotes institutional resilience, and encourages the implementation of evidence-based policies.

Keywords: Taxonomy; Crime; Classification of threats; Cyberattacks; Hybrid threats.

1 Introducción

La Seguridad de la aviación civil, de manera estándar mejor conocida en idioma español como AVSEC y Aviation Security en inglés, es una de las aristas que integran el sistema de seguridad de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), por lo que esta, como organismo especializado de las Naciones Unidas creada en 1944, con el propósito de regular y armonizar las mejores prácticas de la aviación, establece normas y métodos recomendados para que ésta sea segura, eficiente y sostenible entre sus Estados contratantes.

Aunque es común encontrar en diversos documentos e investigaciones el término “seguridad aérea”¹ y “seguridad aeroportuaria”, no se encuentra establecida definición alguna para estos, ni dentro del marco regulatorio de la OACI, ni en la legislación mexicana (Ley de aviación civil, Ley de Aeropuertos y sus respectivos Reglamentos).

Lo mismo sucede para los Programas específicos en la materia, tal como el Programa Nacional de Seguridad de la Aviación Civil (PNSAC) que guarda carácter de confidencialidad, así como en los Planes Locales de Seguridad Aeroportuaria (PLSA), cuya aplicabilidad es exclusiva para los recintos aeroportuarios mexicanos. No se ubica documento normativo que contenga los término o definición alguna que conceptualicen a la “seguridad aérea” y “seguridad aeroportuaria”.

Este artículo sugiere los argumentos para la conceptualización de la seguridad aeroportuaria y, se muestra la posición que ocupa la seguridad aérea dentro de la aviación civil en México, derivada de los términos referidos por la OACI respecto de la protección y métodos de prevención para atestar la integridad de las personas, aeronaves e infraestructura aeroportuaria.

De la misma forma, se establece la propuesta de reconfiguración del listado vigente de los actos de interferencia ilícita en la aviación civil, clasificándolos por tipo de daño y delito, ello con base en el derecho penal del sistema jurídico mexicano y mediante la categorización taxonómica de orden, considerando que la taxonomía es la “ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación” (Real Academia Española, 2014) que facilita la identificación, análisis y gestión de las probables amenazas: del daño al delito.

¿Estamos clasificando bien los actos de interferencia ilícita o seguimos pensando como en el pasado?

¿Clasificamos exclusivamente las amenazas en la aviación civil obviando los delitos o es menester exclusivo del derecho penal?

Esta propuesta de modelo taxonómico desafía la forma en que clasificamos y gestionamos las amenazas en la aviación civil como un nuevo mapa para la protección de personas, aeronaves, instalaciones o servicios de navegación aérea y recintos aeroportuarios.

¹StudySmarter define la seguridad aérea como “una disciplina fundamental en la ingeniería aeronáutica, que se enfoca en garantizar la protección de pasajeros, tripulación y aeronaves durante todas las etapas del vuelo. Comprende un conjunto de procedimientos, tecnologías y normativas destinadas a reducir el riesgo de accidentes y mejorar la resiliencia ante diversos eventos adversos” (StudySmarter, 2025)

Clasificar no significa únicamente etiquetar, sino anticipar riesgos a través de la identificación temprana de vulnerabilidades, lo que posibilita decisiones informadas, la priorización en la asignación de recursos y el cumplimiento del marco normativo. No obstante, como advierte Raffaele De Giorgi, la construcción de conceptos de seguridad no impide que los riesgos se materialicen; pues si bien se conoce aquello que se busca evitar, se desconoce el nuevo riesgo que surge de la decisión tomada para prevenir el primero (Espinosa de los Montero Sánchez *et al.*, 2023).

En concordancia con el sistema jurídico mexicano es que se deriva esta propuesta de clasificación que se conoce aún no ha sido objeto de estudio previo, tanto en lo regional como en lo local, por lo que el enfoque para su integración aborda perspectivas multidisciplinarias -aviación civil, seguridad, protección civil, derecho penal, psicosocial y cultural- para su debida fundamentación y motivación.

Dentro de los resultados esperados se ubican mejores medidas de protección de la seguridad de la aviación civil para facilitar la identificación y gestión de amenazas; intercambio de información mediante datos reclasificados por tipo de daño y delito; contribución a la implementación de medidas de protección basadas en el análisis de datos e incremento de concientización y fortalecimiento de la cultura de la seguridad -producto de la mejor comprensión de las amenazas frente a la adopción de acciones de mitigación de eventos no deseados- convirtiendo la reclasificación de los actos de interferencia ilícita en fuente potencial para el establecimiento de criterios base de futuras investigaciones en la materia.

De acuerdo con el Código Penal Federal, en lo concerniente a tipos de daño en el derecho penal, los daños se refieren a cualquier acción que causa un perjuicio a una propiedad ajena, entre los que se encuentran la destrucción o inutilización (intención de los actos de interferencia ilícita), cuya sanción varía en función de la gravedad del daño y las circunstancias en las que se comete el delito, existiendo en el derecho penal el daño doloso y el agravado dadas sus características particulares con sanciones como multa, prisión o inhabilitación del perpetrador para ejercer un empleo o cargo público si estuviese involucrado algún funcionario del Estado.

Estas consideraciones del tipo de daño deberán valer como elemento fehaciente en el establecimiento de las responsabilidades pertinentes frente a los hechos constitutivos de un probable acto de interferencia ilícita dada su intencionalidad (cultura justa) y acorde a las regulaciones nacionales e internacionales en la materia. Deben sumársele aquellos que la legislación señale en los supuestos en los que se cometan a bordo de una aeronave cuyo Estado de matrícula sea diferente al de los Estados Unidos Mexicanos.

En México, considerando el delito como “*el acto u omisión que sancionan las leyes penales*” como lo cita el Artículo 7° del Código penal federal (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024), los delitos son clasificados de distintas maneras, entre las que destacan por el bien jurídico protegido; por la forma de comisión (dolosa o culposa); y por su naturaleza (instantáneos, continuados, etc.) como se aprecia en la Figura 1.

Otras clasificaciones del delito relevantes surgen por el ámbito de competencia y según su forma de comisión.

Por competencia

- Delitos de fuero común. - *De competencia a tribunales estatales*
- Delitos de fuero federal. - *De competencia a tribunales federales tales como delitos contra la salud y delitos contra la seguridad del Estado*



Figura 1: La clasificación del delito puede variar por entidad federativa (existen 33 códigos penales en México).

- Delitos de alto impacto. - *Se utiliza en algunas entidades federativas con base al nivel de percepción de seguridad de la población*

Por la forma de comisión

- Delitos de comisión. - *A través de la conducción de un acto*
- Delitos por comisión. - *Al no realizar un acto que la ley exige*

Como se puede apreciar, la clasificación del delito conlleva una gama de diversas condiciones y particularidades que ofrece amplios contextos del marco jurídico, por lo que, para esta investigación, se considera exclusivamente la aplicabilidad a la seguridad de la aviación civil, acotando a los que mantienen un mayor grado de pertinencia hacia aquellas clasificaciones orientadas al bien jurídico protegido y forma de comisión del delito -tentativa o acto que ponga en riesgo la vida, los bienes, instalaciones o servicios de navegación aérea y/o recintos aeronáuticos- reconocido en la aviación civil como *acto de interferencia ilícita*.

2 Metodología

Durante el proceso de investigación, se ha empleado una metodología de investigación descriptiva dado que “*se reseñan las características o rasgos de la situación o fenómeno objeto de estudio*” (Bernal, 2006) y documental histórica de archivos de fuentes gubernamentales y análisis de contenido, incluida la documental-descriptiva por el “*análisis de la información escrita sobre un determinado tema, con el propósito de establecer relaciones, diferencias, etapas, posturas o estado actual del conocimiento respecto del tema objeto de estudio*” (Bernal, 2006).

Respecto la clasificación y análisis para la categorización, éstas se encuentran tanto en apego al criterio de taxonomía de orden como al derecho penal en el sistema jurídico mexicano aplicado a la clasificación vigente de los actos de interferencia ilícita bajo el criterio selectivo de aquellos reconocidos por el marco regulatorio tanto a nivel internacional como nacional para que el modelo pueda ser reproducido por cualquier autoridad aeronáutica, administración aeroportuaria u operador aéreo.

Tabla 1: Clasificación de actos de interferencia ilícita cometidos globalmente en el periodo 2015-2022. Fuente: [Sánchez Escobar y Núñez Morales \(2025: 84\)](#).

Año	Totales	Aeronaves en vuelo	Aeropuertos y otras instalaciones	Uso de aeronave como arma	Ciberataques	Apoderamiento ilícito de aeronave	Otro tipo de acto
2015	13	1	4	0	0	4	4
2016	0	0	0	0	0	0	0
2017	21	1	9	1	1	2	7
2018	36	0	16	1	1	2	16
2019	0	0	0	0	0	0	0
2020	12	2	3	0	0	1	6
2021	42	4	9	0	5	9	1
2022	61	7	30	2	2	2	18

* Nota: Para los años 2016 y 2019 no se obtuvo acceso a la página de “desarrollo económico del transporte aéreo”, motivo por el cual en la tabla los datos de referencia por actos de interferencia ilícita globales se marcan con cero.

3 Resultados

El artículo 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos estipula que “...*todos los tratados que estén de acuerdo con la misma, celebrados y que se celebren por el Presidente de la República, con aprobación del Senado, serán la Ley Suprema de toda la Unión*” ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2025](#)).

La Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), como autoridad en la materia, debe cumplir con los Anexos que conforman al Convenio sobre Aviación Civil Internacional ([Agencia Federal de Aviación Civil, 2021](#)), mejor conocido como “Convenio de Chicago”, para este caso, el Anexo 17 sobre Seguridad de la Aviación y, con ello crear Leyes, Reglamentos, Normas oficiales y/o Circulares obligatorias para su debido cumplimiento de acuerdo con la naturaleza de las actividades conducidas por la industria, para ello “...*Los jueces de cada entidad federativa se arreglarán a dicha Constitución, leyes y tratados, a pesar de las disposiciones en contrario que pueda haber en las Constituciones o leyes de las entidades federativas*” ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2025](#)).

La OACI, a través de su Anexo 17 sobre seguridad de la aviación, en su sección de definiciones más que ofrecer una clasificación del delito enlista algunos tipos de acto de interferencia ilícita, de forma enunciativa más no limitativa, a modo de uniformar estas globalmente.

Se han registrado ante la OACI un total de 185 actos de interferencia ilícita de acuerdo con [Sánchez Escobar y Núñez Morales \(2025\)](#) (Ver Tabla 1).

De la data recopilada globalmente se crean estadísticas de actos de interferencia ilícita cometidos y estas sirven como referente para la mejora continua de la seguridad de la aviación civil a los Estados, contribuyendo así a la adopción de medidas de mitigación en ellos mediante el intercambio de experiencias (mejores prácticas de la industria), obteniendo que “*Los aeropuertos son el mayor atractivo para la comisión*

de este tipo de irrupciones dado que su impacto mediático es de mayor alcance y fácil acceso por parte de la prensa para el registro de los hechos en sitio al momento de estar cometiendo el acto violento o cuando se está intentando causar daño para obtener transmisiones “en vivo” y “en directo” para el mundo...” (Sánchez Escobar y Núñez Morales, 2025).

El modelo de transparencia y cooperación interinstitucional (reciprocidad de la información) se basa en la “... firme voluntad política de los Estados y la industria para seguir colaborando a través de la OACI y obtener resultados a nivel nacional, regional y mundial que garanticen la mejora progresiva de la seguridad de la aviación. Se insta encarecidamente a los Estados y a la industria a compartir anualmente sus experiencias, incluyendo los éxitos, los desafíos y las lecciones aprendidas...” (OACI, 2024).

La AFAC, para el intercambio de información y cooperación, instituye la circular obligatoria CO SA-17.16/19 que establece la metodología para evaluación de amenazas y gestión de riesgos en seguridad de la aviación civil cuya aplicabilidad de forma lateral, es solo con fines de “proporcionar información como son datos empíricos y estadísticos disponibles de incidentes ocurridos, de actos de interferencia ilícita y otros relacionados con la seguridad en la aviación civil” (Agencia Federal de Aviación Civil, 2019).

El objetivo primario del Estado Mexicano, con respecto a la seguridad de la aviación civil es garantizar la seguridad y protección de los pasajeros, las tripulaciones, el personal de tierra, el público en general, las aeronaves y las instalaciones y servicios de los aeropuertos que prestan servicios a la aviación civil contra actos de interferencia ilícita perpetrados en tierra o en vuelo. Esto se lleva a cabo mediante una combinación de medidas y la organización de diversos recursos humanos y materiales a nivel internacional, nacional y aeroportuario. (Dirección de Seguridad de la Aviación Civil, 2025)

Como se ha mencionado, la Autoridad de la aviación civil en México es la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), por lo que de acuerdo con el artículo 3º, párrafo XLII del DECRETO por el que se crea el órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, denominado Agencia Federal de Aviación Civil (DECRETO por el que se crea el órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019) tiene la atribución de:

Dictar y vigilar que se ejecuten las medidas de seguridad, preventivas o las actividades previstas por las leyes nacionales, reglamentos, tratados internacionales y demás disposiciones jurídicas aplicables, relativos a actos de interferencia ilícita y de terrorismo, en coordinación con el Comité Especializado de Alto Nivel en materia de Desarme, Terrorismo y Seguridad Internacionales y Comité Nacional de Seguridad Aeroportuaria. Así como participar con los organismos internacionales de aviación civil e intervenir en las negociaciones de tratados y convenios que en materia de interferencia ilícita y de terrorismo, celebren los Estados Unidos Mexicanos con otros países.

La Ley de Aviación Civil en su artículo 78 Octies, Capítulo XV Quáter de la seguridad de la aviación civil, señala como objetivo primordial la seguridad de las personas en todos los asuntos relacionados contra los actos de interferencia ilícita, clasificándolos para ello en siete puntos específicos y un octavo acotando en aquellas acciones u omisiones que trasgredan las disposiciones jurídicas que comprometan la seguridad de una aeronave en vuelo o en tierra, o la seguridad de las personas pasajeras, tripulación, personal de tierra, o bien, de las personas en su conjunto que se encuentren en el recinto de una instalación de aviación civil (Ley de Aviación Civil, 2023).

Por su parte, el párrafo VI del Artículo 5° de la Ley de Seguridad Nacional ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2021](#)) declara como amenazas a la seguridad nacional los actos en contra de la seguridad de la aviación, pero, sin precisar cuáles son estos como lo es en la Ley de Aviación Civil.

Si un concepto no está definido, a pesar de ser utilizado con frecuencia, como lo son la “seguridad aeroportuaria” y la “Seguridad aérea”, puede generarse ambigüedad e impedir el avance del conocimiento, limitando así la capacidad de análisis. Esta falta de definición conlleva malentendidos y dificulta la construcción de argumentos sólidos, lo que puede ser interpretado de múltiples maneras y conducir a confusión y desacuerdo entre partes.

En materia de investigación se pueden presentar serias dificultades para reproducir resultados o para construir sobre hallazgos de otras investigaciones pasadas o presentes, limitando así asertividad en investigaciones futuras del tema. La seguridad representa confianza y tranquilidad, y puede definirse como el conjunto de medidas y acciones orientadas a proteger a un ente frente a los riesgos a los que está expuesto. Se fundamenta en la certeza de que no existe una amenaza inmediata en la actividad, lo que permite mantener la percepción de estar libre de un riesgo específico ([Carmona Castillo, 2011](#)).

Por lo tanto, si el adjetivo “aeroportuario(ria)” se refiere a aquello que es perteneciente o relativo al aeropuerto, y en virtud del cambio de paradigma que implica la transición de una visión tradicional del Estado como único garante de la seguridad hacia un modelo centrado en la protección integral de las personas y sus intereses, tal como se señala en el Informe sobre Desarrollo Humano del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de 1994 sobre las nuevas dimensiones de la seguridad humana, resulta pertinente ampliar el concepto de seguridad ([Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo \(PNUD\), 1994](#)).

En este contexto, se identifican diversas facetas que deben integrarse en el sistema de seguridad de la aviación civil, tales como la seguridad sanitaria (incluyendo la prevención y gestión de epidemias y pandemias), la seguridad ambiental, la seguridad pública y la seguridad ciudadana, entre otras, por lo que en consonancia con las definiciones de seguridad establecidas en los Anexos 17 y 19 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ([OACI, 2016, 2022](#)), propongo en consecuencia la formulación de una definición institucionalizada para México en materia de seguridad de la aviación civil, que refleje estos enfoques multidimensionales y actuales, siendo esta la siguiente:

Seguridad aeroportuaria.- *“Protección de la aviación civil mediante estrategias y tácticas orientadas a mantener el orden, la seguridad y eficiencia en las operaciones aeroportuarias, salvaguardando la integridad física, emocional, social y medioambiental de usuarios, empleados, población en general e instalaciones. Incluye la protección contra interferencias ilícitas, delitos civiles o penales, daños derivados de fenómenos naturales o antrópicos, la mitigación de impactos ambientales y la prevención de accidentes e incidentes”.*

La **seguridad aérea** constituye un pilar fundamental dentro de la ingeniería aeronáutica, orientado a salvaguardar la integridad de pasajeros, tripulación y aeronaves en todas las fases del vuelo. En este sentido, StudySmarter la define como una disciplina esencial para garantizar dichos objetivos. No obstante, en el contexto mexicano persiste la necesidad de desarrollar una definición propia y documentada, adaptada a las particularidades del sector y alineada con sus retos operativos y regulatorios. Una definición institucionalizada contextualizada no solo facilitaría la estandarización normativa y técnica, sino que también permitiría fortalecer las estrategias de mejora continua y la formulación de políticas de seguridad aérea -Aviation Security y Seguridad Operacional- con base en evidencia científica.

En el marco organizacional de la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) se identifica la Dirección Ejecutiva de Seguridad Aérea, la cual comprende, en materia de seguridad, tanto la Dirección de Seguridad Aérea como la Dirección de Seguridad de la Aviación Civil. Esta estructura institucional refleja un enfoque integral de seguridad que trasciende la visión limitada al vuelo propuesta por *StudySmarter*, al incorporar estrategias y técnicas orientadas no solo a la operación aérea, sino también a la seguridad de los recintos aeroportuarios. Dicho alcance permite abordar de manera sistémica la protección de pasajeros, tripulación y aeronaves en todas las fases del proceso de transporte aéreo, fortaleciendo así la gestión de riesgos en un entorno operativo complejo.

Ante esta situación conceptual inexistente de la seguridad aérea, propongo la formulación de la definición institucionalizada para México que refleje enfoques transdisciplinarios vigentes, siendo esta la siguiente:

Seguridad aérea.- *“Conjunto de políticas, normativas, procedimientos y prácticas estándar orientadas a garantizar que las operaciones aéreas se desarrollen dentro de un ambiente controlado que integra las dimensiones de seguridad operacional y seguridad de la aviación civil en la protección de personas, aeronaves y recintos aeronáuticos; así como la prevención de incidentes y accidentes, ambas a través de la gestión integral de riesgos para mitigar su exposición a peligros y amenazas”.*

Al fortalecer el andamiaje conceptual mediante mecanismos que contribuyan a la cultura de seguridad, entendida esta como el conjunto de normas, creencias, valores, actitudes y supuestos inherentes al funcionamiento cotidiano de las organizaciones, debería convertirse en valor intangible para la organización de acuerdo con [OACI \(2015\)](#).

Tratándose de delitos o daños por acciones con dolo o negligencia culposa, aquellos “... sucesos de seguridad graves, incluidos incidentes, deficiencias y violaciones, normalmente los perpetradores no deberían estar exentos de sanciones...” ([OACI, 2015](#)).

Esto refuerza la propuesta de comenzar a utilizar el término de seguridad aeroportuaria con perspectiva de “seguridad humana”, enfocado principalmente en las personas y sus intereses de acuerdo con el cambio de paradigma propuesto por el [Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo \(PNUD\) \(1994\)](#), sin el menoscabo del expertise y ámbitos de competencia de los actores que involucran al sistema de seguridad aeroportuaria en México. Para ello es necesario el esfuerzo colaborativo de estos con las autoridades competentes respecto la presunta comisión del delito, dado que no todos los incidentes en materia Aviation Security -AVSEC- necesariamente ocasionan lesiones a las personas o daños materiales.

La reforma de junio del 2024 al Artículo 399 del Código Penal Federal comienza a abordar las sanciones que incluyan elementos propios de la aviación civil, para el caso, expresamente cita que “A quien utilice aeronaves pilotadas a distancia...” para causar daño, destrucción o deterioro en perjuicio de tercera persona serán sancionados hasta un 50 % más de la sanción procedente ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024](#)). También considera el hecho de que, si los daños son causados por una persona ascendiente, descendiente, cónyuge, consanguinidad hasta segundo grado, se perseguirán por querrela.

Se conocen actos de interferencia ilícita del pasado en donde por el cobro de seguros de vida se colocaron y detonaron artefactos explosivos a bordo de aeronaves en vuelo causando la muerte a sus ocupantes, así como imitadores del *modus operandi* ².

²Albert Guay para poner fin a su matrimonio y cobrar el seguro de vida de su esposa, hace detonar explosivos en el vuelo 108 de Canadian Pacific Airlines un 9 de septiembre de 1949 ([Pelchat, 2015](#)). Esto motivó el surgimiento de imitadores como John Graham que a bordo del vuelo 629 de United, el 2 de noviembre de 1955, coloca 25 cartuchos de dinamita para asesinar a su madre y cobrar el seguro de vida ([Trembath, 2020](#)).

De la misma forma, es de considerar que la comisión de un delito puede llevar implícito más de un tipo de delito en un momento dado o en un lapso de tiempo (condición en la que una persona comete varios delitos, ya sea con una sola acción o con varias acciones distintas). A esto se le conoce como “*Concurso de delitos*”, siendo **concurso ideal** cuando con una sola conducta se cometen varios delitos y, **concurso real** cuando con pluralidad de conductas se cometen varios delitos de acuerdo con los artículos 18 y 19 en [Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión \(2024\)](#).

Dentro de las reformas al Código Penal Federal mencionadas, se incluyen elementos del terrorismo, tales como el acuerdo para cometer el acto, prepararlo, intención de cometerlo y la comisión misma del acto. Para ello, señala las penas convencionales por el uso de “*sustancias tóxicas, armas químicas, biológicas o similares, material radioactivo, material nuclear, combustible nuclear, mineral radiactivo, fuente de radiación o instrumentos que emitan radiaciones, explosivos, o armas de fuego, o por incendio, inundación o por cualquier otro medio violento, intencionalmente realice actos en contra de bienes o servicios, ya sea públicos o privados, o bien, en contra de la integridad física, emocional, o la vida de personas, que produzcan alarma, temor o terror en la población o en un grupo o sector de ella, para atentar contra la seguridad nacional o presionar a la autoridad o a un particular, u obligar a éste para que tome una determinación*” y de acuerdo con su artículo 139, párrafo I y, II, se aumentarán en una mitad cuando el delito sea cometido contra de un bien inmueble de acceso público; genere un daño o perjuicio a la economía nacional o cuando se detenga en calidad de rehén a una persona ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024](#)).

En el derecho penal es considerado el ánimo de cometer el delito (intencionalidad) y refiere al estado mental del perpetrador al momento de cometer el delito “*mens rea*” ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024](#)). En la aviación civil, la interferencia ilícita no es solo una infracción: es el delito de la aviación, tan grave como cualquier crimen en el derecho penal, incluida la transmisión de información falsa.

Por otra parte, no basta con que se haya realizado una acción (*actus reus*) para que se considere un delito; es necesario probar que el acusado actuó con la intención de cometerlo. La intencionalidad puede ser directa, cuando el acusado quiere específicamente el resultado del delito, o eventual, cuando el acusado, aunque no busca el resultado, es consciente del riesgo de que ocurra y lo acepta.

La intencionalidad es un elemento fundamental para determinar la culpabilidad del acusado y esta puede incidir directamente en la pena que le deba ser imputada, por ejemplo, un delito cometido con premeditación puede llevar a una pena mayor que un delito cometido sin la intención.

La dificultad para probar la intencionalidad frente a una tentativa o acto de interferencia ilícita puede llevar a la desestimación de los cargos.

Se considera la aplicación de sanciones frente al uso de instalaciones destinadas al tránsito aéreo para actividades delictivas o el uso de aeródromos, aeropuertos, helipuertos, pistas de aterrizaje o cualquiera otra instalación destinada al tránsito aéreo de acuerdo con el Artículo 172 Bis del Código Penal Federal, sin embargo, estas pueden no ser catalogadas como actos de interferencia ilícita, por ej., los delitos contra la salud, tráfico de personas con fines de trata, entre otros, que no son citados en la Ley de aviación civil en su artículo 78 Octies.

4 Discusión

Con la celebración del Convenio sobre Aviación Civil Internacional ([Agencia Federal de Aviación Civil, 2021](#)), México tiene la obligación y compromiso de trasladar las normas y métodos recomendados plasmados en todos y cada uno de los Anexos hacia el marco jurídico mexicano. A la par, debe mantener

especial cuidado y atención para no violentar otras disposiciones estipuladas en Leyes aplicables, citando a modo de ejemplo la Ley de Seguridad Nacional, Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos, entre otras.

Se deben explorar enfoques transdisciplinarios para mantener la pertinencia de la taxonomía de amenazas en AVSEC sugerida: del daño al delito, con base en los códigos penales para su debida clasificación de orden.

En esta concentración de los actos de interferencia ilícita señalados en documentos de la OACI y de primer orden en el marco legal en México, tomo como referencia lo establecido en el Código Penal Federal respecto a los daños y delitos ahí clasificados, que van desde el doloso y hasta agravado de existir condicionantes particulares ([Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2024](#)).

Para el caso de la aviación civil, la forma de comisión del delito recae en la figura de “*doloso*” dada la intención de causar daño o perjuicio que, en relación con los actos de interferencia concernientes al marco normativo vigente, se citan la por ej., la amenaza por artefacto explosivo improvisado (IED por sus siglas en inglés); ciberataque, falsedad de información y el sabotaje.

En aquellos que causan la privación o la significan (se citan como privativos) se pueden correlacionar con el apoderamiento ilícito de aeronaves o recintos aeronáuticos; toma de instalaciones; secuestros y la toma de rehenes a bordo de las aeronaves o dentro de recintos aeronáuticos, dada la privación de la libertad y la toma forzada de control de estas.

En el supuesto de ataques (armados, vandalismo o robo), daños materiales en aeronaves e instalaciones o destrucción de estas, se pueden considerar que refieren al patrimonio y que pueden ser reales, personales o intelectuales.

Por último, de acuerdo con el listado de tentativas y/o actos de interferencia ilícita de referencia, tenemos los intrusivos al discurrir sobre ciber incidentes; detección oportuna de artefactos explosivos improvisados; introducción de objetos o sustancias peligrosas a las aeronaves o instalaciones aeroportuarias; así como el sabotaje e intrusión a instalaciones o servicios de navegación aérea, recintos aeronáuticos o aeronaves.

Es necesario contar con la conceptualización de los términos utilizados coloquialmente por los actores de la industria de la aviación civil para evitar sesgos o interpretaciones equívocas, por lo que la propuesta descrita para el término “*seguridad aeroportuaria*”, debe ser tomada en consideración por la autoridad de aviación civil y ser incluida en la “*Lista de definiciones y acrónimos para los programas de seguridad para la prevención de actos de interferencia ilícita*” ([Agencia Federal de Aviación Civil, 2025](#)), o adecuarla a los términos que esta determine con el propósito de crearla, uniformarla y motivar su uso adecuado en documentos de primer nivel, circulares obligatorias y/o productos derivados del marco regulatorio en la materia.

Una línea de investigación futura podría orientarse a evaluar cómo una taxonomía ampliada de los actos de interferencia ilícita impactaría en la configuración del derecho penal. Este esfuerzo permitiría identificar vacíos normativos, ajustar la tipificación de delitos y delimitar con mayor precisión las conductas que atentan contra la seguridad de la aviación. Tal aproximación facilitaría no solo la coherencia legislativa, sino también la aplicación efectiva de sanciones, ofreciendo un marco jurídico más sólido frente a la evolución de las amenazas.

Otra vertiente de investigación se enfocaría en la utilidad de una taxonomía ampliada como instrumento de gestión de riesgos aplicable a la seguridad de la aviación civil. Clasificar de manera más precisa los

actos de interferencia ilícita permitiría anticipar escenarios de amenaza, fortalecer la capacidad de respuesta institucional y optimizar la asignación de recursos en la aviación. Esta visión integradora abriría el camino hacia políticas públicas más resilientes, que armonicen la protección de las personas, aeronaves e infraestructura aeroportuaria con la respuesta penal.

5 Conclusiones

Si bien la OACI establece la no punitividad ante la desviación de procedimientos, la misma “Cultura justa” (OACI, 2015) señala que quienes cometan estas con intencionalidad debe ser sancionados por lo que al ofrecer la clasificación de los actos de interferencia ilícita en aviación civil a través de la categorización taxonómica de orden por tipos de daño y delito en el derecho penal mexicano, se amplía el contexto en materia de derecho penal a los especialistas Aviation Security -AVSEC- y facilita su comprensión para el fincado de las responsabilidades que deben enfrentar los perpetradores.

Se ofrece también la posibilidad de ampliar el listado de tentativas o actos de interferencia ilícita, proponiendo para ello catalogar y asignar de acuerdo con el tipo de daño y/o delitos sugeridos: Dolosos, privativos, patrimoniales e intrusivos, tomando como referencia la Tabla 2.

Tabla 2: Propuesta de categorización taxonómica de orden de los actos de interferencia ilícita por tipo de daño y delito

Categoría	Definición	Ejemplos
Dolosos	Con la intención de causar daño o perjuicio	• Amenaza por Artefacto Explosivo Improvisado (IED) • Ciber-ataque • Falsedad • Sabotaje
Privativos	Que causan privación o la significa	• Apoderamiento ilícito • Secuestro • Toma de instalaciones • Toma de rehenes

Continúa en la siguiente página

Categoría	Definición	Ejemplos
Patrimoniales	Que se refieren al patrimonio y que pueden ser reales, personales o intelectuales	• Ataque (armado, vandalismo, robo, etc.) • Daños en aeronave • Daños en instalaciones • Destrucción de aeronave • Destrucción de instalaciones
Intrusivos	Que se ha introducido alguien o algo sin la debida autorización	• Ciber-incidente • Detección de Artefacto Explosivo Improvisado (IED) • Introducción de objetos peligrosos • Introducción de sustancias peligrosas • Intrusión a las instalaciones o aeronaves • Intrusión de drones en espacio aéreo controlado/restringido

En el ámbito de la aviación civil, la interferencia ilícita representa una amenaza directa a la seguridad de la aviación civil en un contexto amplio. Su análisis jurídico resulta relevante, dado que estos actos poseen características equiparables a las conductas tipificadas como delitos en el derecho penal. No obstante, en el contexto normativo aeronáutico, persiste la necesidad de una clasificación precisa bajo la perspectiva de taxonomía de orden que permita articular medidas sancionatorias proporcionales y efectivas.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), mediante el Anexo 17 del Convenio de Chicago (OACI, 2022), reconoce a la interferencia ilícita como un acto que compromete la seguridad de pasajeros, tripulación y aeronaves. En el marco mexicano, estos actos se vinculan con figuras delictivas que, por su naturaleza, ameritan la aplicación de sanciones de carácter administrativo y penal. Particularmente, las sanciones privativas -que implican la restricción o supresión de derechos fundamentales, incluida la libertad personal- adquieren relevancia al establecer un marco de disuasión y control que trasciende la simple imposición de multas.

La equiparación de la interferencia ilícita con el delito en el ámbito del derecho penal evidencia la necesidad de fortalecer el marco jurídico aeronáutico mediante la integración de criterios doctrinales y normativos que garanticen una clasificación homogénea de estas conductas. Ello permitiría no solo una respuesta jurídica proporcional, sino también la consolidación de una política de seguridad aérea basada en la prevención y en la protección efectiva de los derechos involucrados en cuanto a seguridad de la aviación civil refiere: AVSEC.

6 Referencias

- Agencia Federal de Aviación Civil (2019). Circular Obligatoria CO SA-17.16/19 que establece la metodología para la evaluación de amenazas y gestión de riesgos en seguridad de la aviación civil. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/650497/co-sa-17-16-19.pdf>.
- Agencia Federal de Aviación Civil (2021). Convenio sobre aviación civil internacional. <https://www.gob.mx/afac/acciones-y-programas/convenio-sobre-aviacion-civil-internacional>.
- Agencia Federal de Aviación Civil (2025). Lista de definiciones y acrónimos para los programas de seguridad para la prevención de actos de interferencia ilícita. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/989046/definiciones-avsec-rev-1-08-abr-25-09042025.pdf>.
- Bernal, C. (2006). *Metodología de la Investigación*. 2a. edición. Pearson Educación. ISBN: 978-970-26-0645-1.
- Carmona Castillo, R. R. (2011). Principales Funciones y Logros de la Comisión de Seguridad Hemisférica. [Monografía]. Universidad Alas Peruanas. <https://www.monografias.com/trabajos85/funciones-comision-seguridad-hemisferica/funciones-comision-seguridad-hemisferica>.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2021). Ley de Seguridad Nacional (Última Reforma DOF 20-06-2021). México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LSN.pdf>.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2024). Código Penal Federal (Últimas Reformas DOF 07-06-2024). México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPF.pdf>.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2025). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Última Reforma DOF 15-04-2025). México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>.
- DECRETO por el que se crea el órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, d. A. F. d. A. C. D. P. (16 de octubre de 2019). Diario Oficial de la Federación. (16 de octubre del 2019), (México) Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5575548&fecha=16/10/2019#gsc.tab=0.
- Dirección de Seguridad de la Aviación Civil (2025). Objetivo de Seguridad de la Aviación Civil (AVSEC). www.gob.mx/afac/acciones-y-programas/seguridad-de-la-aviacion-civil.
- Espinosa de los Montero Sánchez, J., Jiménez Zamudio, J., Hernández Rodríguez, M., Sánchez Hernández, C., Torres Rocha, M., Rodríguez González, A., Huerta Pacheco, N., Zackseski, C., Grieco, C., Fiorentino, D., Di Viggiano, P., y De Giorgi, R. (2023). *La Seguridad es Riesgo*. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 978-607-30-8225-9.
- Ley de Aviación Civil (2023). Reformada Diario Oficial de la Federación [DOF] 3 de mayo del 2023, (México). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/834913/ley-aviacion-civil-ur-vigente.pdf>.
- OACI (2015). Doc 8973 - distribución limitada: Manual de seguridad de la aviación. p. 9-7.
- OACI (2016). *Anexo 19: Gestión de la Seguridad Operacional*. 2a. Edición. ISBN: 978-92-9258-002-5. https://www2023.icao.int/SAM/Documents/2017-SSP-BOL/Anexo19_2daEdition_es.pdf.

OACI (2022). *Anexo 17. Seguridad de la aviación. Protección de la aviación civil internacional contra los actos de interferencia ilícita*. ICAO eLibrary. ISBN: 978-92-9265-072-8. <https://elibrary.icao.int/product/262960>.

OACI (2024). Doc 10118: Plan global para la seguridad de la aviación. 2a edición, ISBN: 978-92-9275-459-4, <https://www2023.icao.int/Security/Documents/GLOBAL%20AVIATION%20SECURITY%20PLAN%202nd%20Ed.SP.pdf>.

Pelchat, A. (2015). A Monstrous Plot: Ending a marriage was difficult in Catholic Quebec, but Albert Guay found a way. <https://www.canadashistory.ca/explore/politics-law/a-monstrous-plot>.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (1994). *Informe sobre Desarrollo Humano 1994*. Fondo de Cultura Económica. ISBN: 968-16-4489-1. <https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdr1994escompletonostats.pdf>.

Real Academia Española (2014). Taxonomía, Definición. En *Diccionario de la Lengua Española*. 23a Edición. <https://dle.rae.es/taxonom%C3%ADa>.

Studysmarter (2025). Seguridad Aérea: Definición y técnicas. <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/aviacion/seguridad-aerea/>.

Sánchez Escobar, R. y Núñez Morales, J. I. (2025). Implantando la Seguridad de la Aviación Civil (AV-SEC) en talleres de mantenimiento aeronáutico: Caso México. *Revista Ciencias Espaciales*, 16(1):73–94. DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i1.20510>.

Trembath, B. (2020). Mass murder in the sky: John Gilbert Graham and United Flight 629. <https://history.denverlibrary.org/news/mass-murder-sky-john-gilbert-graham-and-united-flight-629>.

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 las 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.

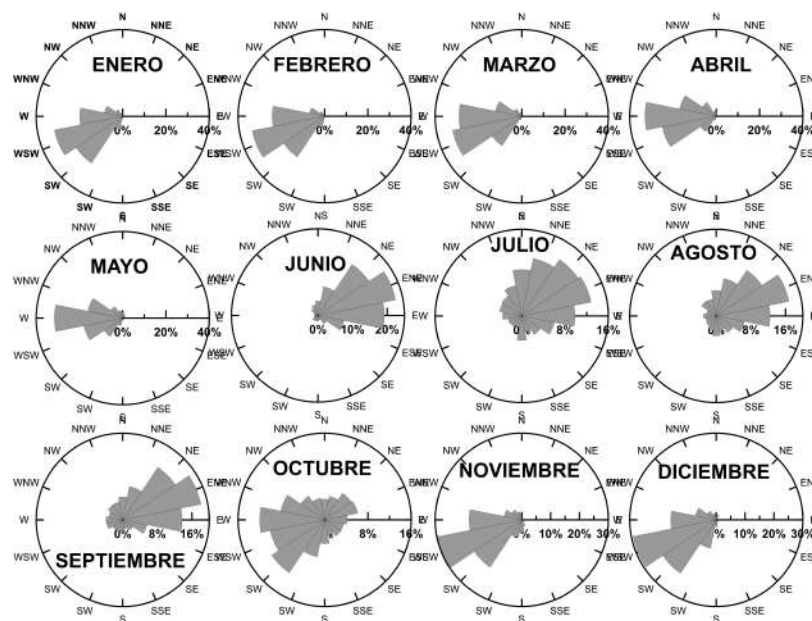


Figura 1: Estudio mensual de vientos en nivel de vuelo FL200 elaborado para un periodo de tiempo de 2004 al 2023. En el estudio se pueden identificar dos patrones de dirección, uno en los meses de noviembre a mayo con dirección del viento del W-SW y un segundo patrón en los meses junio a octubre con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

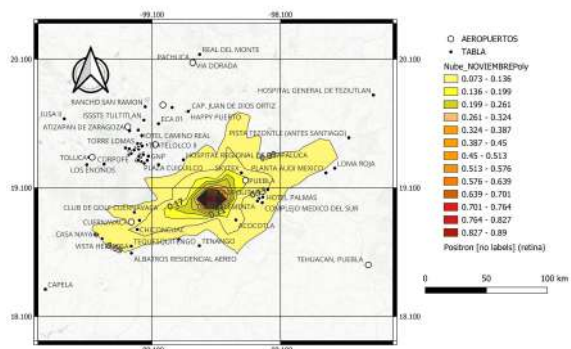
Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los 12 meses para identificar: (1) los periodos con mayor nivel de afectación y (2) las infraestructuras con mayor recurrencia de exposición a ceniza.

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.

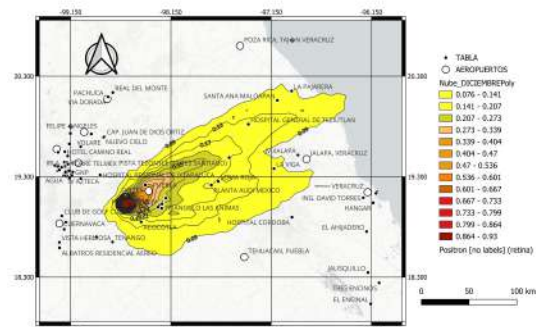
El análisis de los mapas de probabilidad correspondientes al periodo de noviembre a mayo mostró que 33 instalaciones aeronáuticas (aeródromos y helipuertos) se encuentran ubicadas dentro de zonas con al menos un 10% de probabilidad de afectación por ceniza volcánica en caso de una erupción del volcán 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.

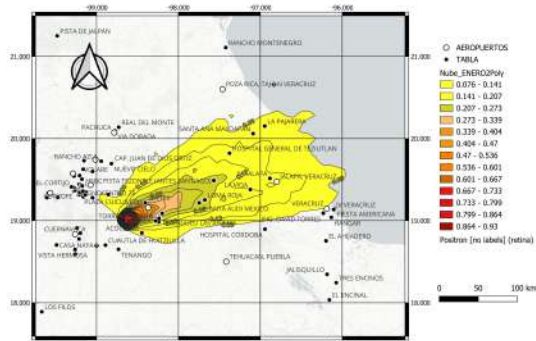
Noviembre



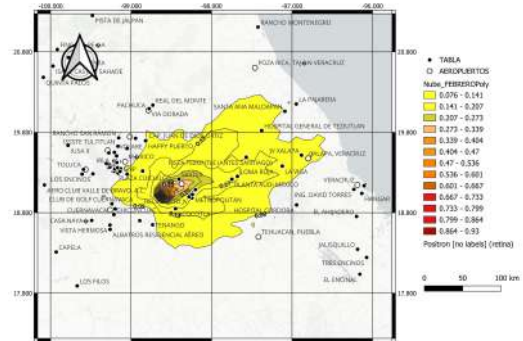
Diciembre



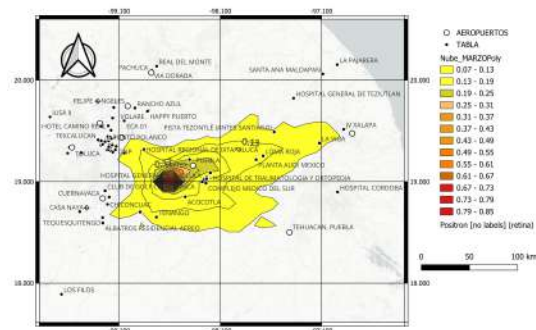
Enero



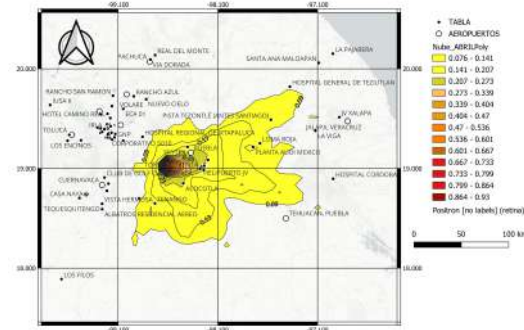
Febrero



Marzo



Abril



Mayo

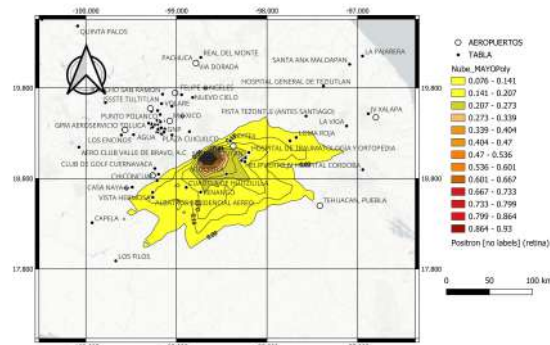


Figura 2: Mapas de probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica. Los mapas están distribuidos de forma descendente de la siguiente manera: Noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo. En los mapas se muestra la zona con una probabilidad por arriba o igual al 10% de afectación 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 %
Cuaautla 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 %

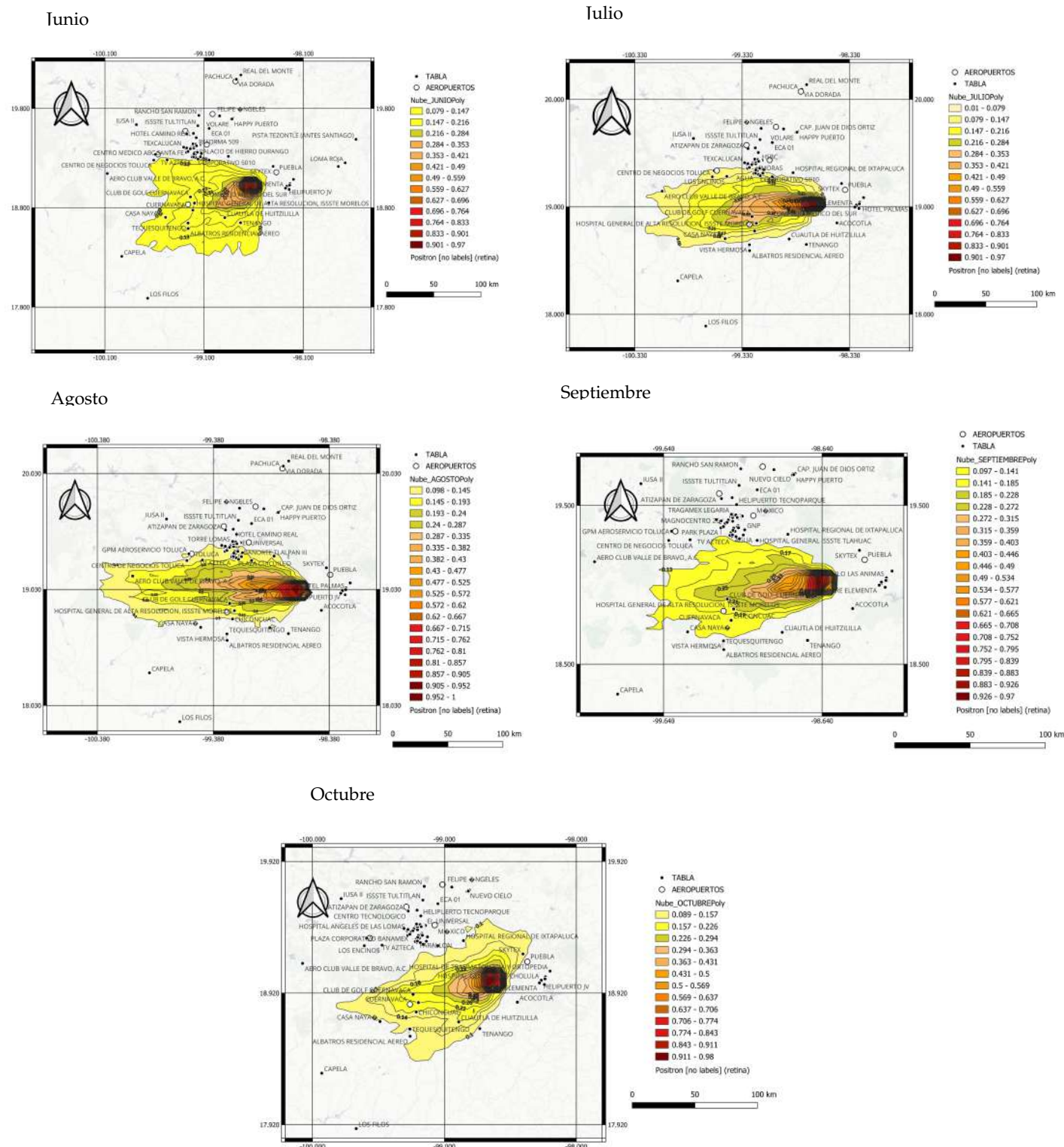


Figura 3: Mapas de probabilidad de afectación por presencia de ceniza volcánica. Los mapas están distribuidos de forma descendente de la siguiente manera: junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En los mapas se muestra la zona con una probabilidad por arriba o igual al 10 % de afectación por ceniza 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 ISSTE 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.

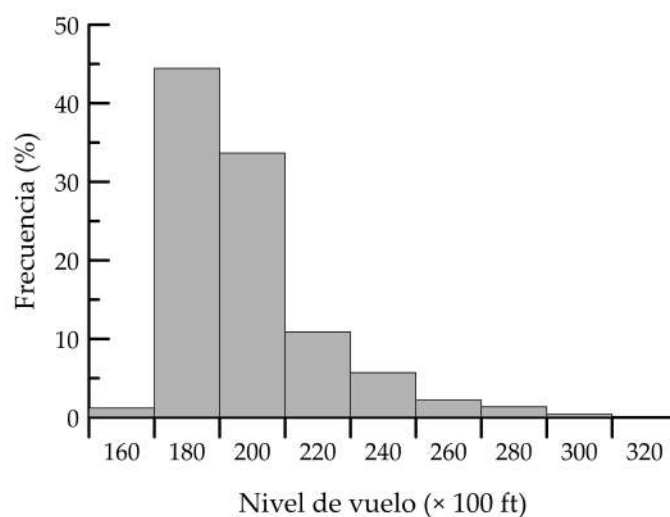


Figura 4: Histograma de altitudes de las columnas eruptivas del volcán Popocatepetl identificadas por la VAAC para las nubes de ceniza reportadas entre 1999 a 2023.

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>.

NOTAS INFORMATIVAS

NOTAS INFORMATIVAS

1 *POLÍTICA EDITORIAL*

La Revista Ciencias Espaciales es una publicación semestral de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Cada año calendario se publica un Volumen que consta de dos Números. El primer número es llamado de primavera (que se publica a más tardar el 15 de junio de cada año) y el segundo de otoño (que se publica a más tardar el 15 de diciembre de cada año); ambos números incluyen artículos de los campos de Astronomía y Astrofísica, Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, Arqueoastronomía y Astronomía Cultural, Ciencias Aeronáuticas, Ciencias Astronáuticas y Ciencias Afines.

La Revista Ciencias Espaciales tiene un Consejo Editorial integrado por: un director, un editor en jefe, editores por campo del conocimiento y académicos externos invitados. Ellos son los encargados de recibir los documentos y gestionar el proceso de selección de los artículos, edición y publicación de la Revista. La Revista Ciencias Espaciales cuenta además con un Consejo Científico Internacional responsable de velar por la calidad del contenido de la Revista. En el interior de la Portada se publican los nombres del Director, Editor en jefe, Miembros del Consejo Editorial y del Consejo Científico.

La Revista Ciencias Espaciales edita trabajos originales de investigación cumpliendo estándares éticos y buenas prácticas propios de publicaciones del ámbito científico y académico. Por ello, se rige en el Código de Conducta y Mejores Prácticas Directrices para Editores de Revistas, basado en el Committee on Publication Ethics (COPE) (<https://publicationethics.org/become-member>) y en el Manual de ética de la investigación en la UNAH (<https://diciht.unah.edu.hn/dmsdocument/973-serie-4>). Los artículos publicados pueden estar referidos a investigaciones científicas en los campos científicos de la Facultad de Ciencias Espaciales. El contenido de cada artículo es responsabilidad de sus autores. Los artículos son evaluados por pares doble ciego.

La revista Ciencias Espaciales publicará artículos originales, utilizando un software especializado para la detección de plagio como garantía de la originalidad de los trabajos recibidos. Sólo se permitirá la publicación de artículos no originales en el marco de convenios realizados con otras publicaciones de las mismas disciplinas comprendidas por la Revista Ciencias Espaciales, informando expresamente de esta situación.

El consejo editorial se reserva el derecho de rechazar o devolver para su revisión, cualquier artículo que no se considere completo o apropiado. Antes de que un artículo sea publicado, sus autores deben mostrar evidencias de contar con los permisos para usar figuras y datos en caso de ser necesario. Si un artículo tiene varios autores, debe presentarse evidencia que todos los coautores desean publicarlo.

La Revista Ciencias Espaciales se encuentra indexada en las bases de datos de Central American Journal Online (CAMJOL) y Latindex.

2 INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

2.1 Para los editores

Los manuscritos son evaluados por el consejo editorial en consulta con pares doble ciego. Los autores pueden sugerir revisores externos, pero la revista no asegura la aceptación del revisor recomendado. El Consejo Editor garantiza el anonimato de los revisores y de los autores y tienen la decisión final sobre la publicación de los manuscritos. Los autores son informados de la aceptación o no aceptación de su manuscrito.

El proceso de revisión y publicación de cada artículo es el siguiente: 1) recepción del artículo de el o la autora por el editor encargado de cada departamento de la Facultad; 2) Remisión de manuscrito y formato de revisión a pares ciegos con el compromiso de mantener el carácter confidencial de toda la información de los trabajos, aun cuando no sean publicados; 3) Informar al autor/a las observaciones realizadas para corregir e incorporar los cambios sugeridos por los revisores; 4) Resolución y notificación de aceptación o no aceptación del artículo por parte del consejo editorial; 5) Publicación del artículo en el volumen y número correspondiente.

2.2 Para los autores

Los autores son responsables de los contenidos de sus artículos, y de garantizar que sus documentos se presenten en la forma adecuada, incluyendo los permisos necesarios para agregar figuras, tablas, u otro material protegido.

La Revista Ciencias Espaciales está bajo una licencia de Creative Commons: Reconocimiento - No Comercial - Compartir igual (CC BY-NC-SA), de acuerdo con la "Declaración de México a favor del ecosistema latinoamericano de acceso abierto no comercial".



Declaración de privacidad: Los nombres y direcciones de correo-electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

Cada artículo que se remita para ser publicado en la Revista Ciencias Espaciales debe organizarse en secciones. Todas las secciones deben escribirse a espacio sencillo de acuerdo a la plantilla disponible en <https://cienciasespaciales.unah.edu.hn/revista-ciencias-espaciales/> y <https://www.camjol.info/index.php/CE/index>. El orden de las secciones es el siguiente:

- Título
- Resumen en idioma español
- Resumen en idioma inglés
- Introducción
- Metodología

- Resultados
- Discusión
- Conclusiones
- Agradecimientos si se considera necesario
- Referencias bibliográficas

2.2.1 Título

- Escrito en mayúsculas, centrado y colocado en la parte superior de la página. El título debe ser conciso, pero informativo. Su objetivo es dar a conocer al lector lo esencial del artículo. No debe exceder las 15 palabras.
- Nombre del autor o los autores. Escribir el nombre completo del autor o autores, indicando su grado académico, su filiación, su dirección de correo electrónico y de preferencia el identificador ORCID.

2.2.2 Resumen en idioma español

Debe incluirse un resumen en idioma español, con las siguientes características:

- Debe tener un máximo de 250 palabras.
- La estructura debe contener el objetivo del estudio; metodología, técnicas o procedimientos básicos utilizados; los resultados más destacados y las principales conclusiones. Hará hincapié en aquellos aspectos del estudio o de las observaciones que resulten más novedosas o de mayor importancia.
- El resumen no debe incluir citas bibliográficas, ni siglas ni abreviaturas, a menos que sean las convencionales conocidas.
- Con el encabezado de palabras clave, inmediatamente después del resumen, se deben incluir de 3 a 5 palabras clave las cuales facilitaran el indizado del artículo.

2.2.3 Resumen en idioma inglés

Un resumen y palabras clave también deben ser presentados escritos en idioma inglés.

2.2.4 Cuerpo del artículo

Al inicio de cada sección, los títulos de primer nivel deben escribirse en letras mayúsculas y minúsculas cursivas negritas. Los títulos de segundo nivel deben escribirse en mayúsculas y minúsculas, en negritas. Los títulos de tercer nivel deben escribirse en mayúsculas y minúsculas, y en letra cursiva. La enumeración de los distintos niveles se hará de acuerdo a la plantilla utilizada por la Revista Ciencias Espaciales y que está disponible en <http://faces.unah.edu.hn/revistace/> y <https://www.camjol.info/index.php/CE/index>.

Se recomienda que el cuerpo del artículo se estructure en las siguientes secciones: Introducción, Metodología, Resultados, Discusión y Conclusiones.

Introducción. La finalidad de esta sección es ubicar al lector en el contexto en que se realizó la investigación, por lo que debe mencionar claramente el propósito de la investigación, por tanto, es importante que se presenten de forma clara los objetivos, la fundamentación teórica, el problema abordado y, cuando corresponda, la hipótesis. Se debe enunciar de forma resumida la justificación del estudio.

Metodología. En términos generales, es la manera estructurada por medio de la cual se ha logrado obtener conocimiento o información producto de la investigación. En términos prácticos, es la manera seleccionada para solucionar el problema estudiado garantizando rigor científico. Puede incluir aspectos como el escenario en el cual se desarrolló la investigación, el o los objetos de estudio, el tamaño de la muestra, condiciones de trabajo, métodos de recolección y análisis de datos.

Resultados. Presente los resultados auxiliándose de tablas y figuras, siguiendo una secuencia lógica. No repita en el texto los datos de las tablas y figuras, destaque los aspectos más relevantes de las mismas. Recuerde que las tablas y figuras deben tener una numeración correlativa y siempre deben estar referidas en el texto. Los resultados deben ser enunciados claros, concretos y comprensibles para el lector; y por supuesto, se deben desprender del proceso investigativo enmarcado en el artículo.

Discusión. Debe centrarse en los resultados de la investigación y hacer hincapié en aquellos aspectos nuevos e importantes del estudio. No debe repetir, de forma detallada, los datos u otras informaciones ya incluidas en los apartados anteriores. Se deben reportar las limitaciones del estudio, así como sus implicaciones en futuras investigaciones. Si es posible, se comparan las observaciones realizadas con las de otros estudios pertinentes.

Conclusiones. Son proposiciones o ideas producto o resultado de la investigación realizada, de modo que se deben relacionar con los objetivos del estudio. Asegúrese de fundamentar sus conclusiones en datos sólidos y suficientes.

Agradecimientos. Los agradecimientos se incluyen al final del texto. Este debe ser un apartado muy breve, en donde se agradece a las personas que han colaborado con la investigación, o a las instituciones que apoyaron el desarrollo del trabajo. También se debe incluir en los agradecimientos a los entes que brindaron el apoyo financiero y otros recursos.

2.2.5 Referencias citadas

La lista de las referencias citadas y las citas deben concordar y ser precisas. Todas las referencias que aparecen citadas en el texto deben de aparecer también en la lista de referencias; y todas las referencias listadas deben de aparecer mencionadas en el texto.

Las referencias deben ser utilizadas en el texto incluyendo el apellido del autor y el año de la publicación. Para construir la lista de referencias se recomienda utilizar las Normas Internacionales APA, en su séptima edición, distinguiendo si la cita se refiere a un solo autor o a varios autores de un artículo, al autor de un libro, sección o capítulo de un libro, una publicación periódica u otra obtenida en Internet. En tal sentido, es necesario incluir todas las fuentes que sustentan la investigación realizada y que se usaron directamente en el trabajo.

2.2.6 Figuras y tablas

Las figuras y tablas se deben entregar por separado en formato PDF, JPG, PNG, TIFF o GIF (con una resolución mínima de 300 dpi). Los créditos de las imágenes deben estar incluidas en la leyenda de las mismas. Es preferible utilizar imágenes elaboradas por el o los autores del artículo. Aquellas imágenes cuyo autor no sea el mismo del artículo deberán contar con la debida autorización. En caso de importarse tablas de datos desde otro software en formato de figura, se tratarán igual que las figuras de imágenes, o alternatively se pueden crear dentro del texto usando la función de diseño de tabla de Word o $\text{\LaTeX}$, según el formato establecido en la plantilla correspondiente.

2.2.7 Abreviaturas y símbolos

En las siglas, abreviaturas y símbolos, use únicamente las de uso común (ejemplo: ONU, UNESCO, OACI, entre otros). Evite las abreviaturas en el título y en el resumen. Cuando en el texto se emplee por primera vez una abreviatura o sigla, esta debe ir precedida del término completo, salvo si se trata de una unidad de medida común.

2.2.8 Recomendaciones generales para presentar el manuscrito

Para presentar el manuscrito, se recomienda al autor o autores tener en cuenta:

- Todo el manuscrito debe presentarse en un solo documento, escrito con letra Palatino, tamaño 11.
- Las páginas se numeran consecutivamente comenzando por la página del título hasta terminar con la última referencia citada.
- Incluya las autorizaciones para la reproducción de material anteriormente publicado, para la utilización de figuras o ilustraciones que puedan identificar a personas o para imágenes que tengan derechos de autor. Adjunte la cesión de los derechos de autor y formularios pertinentes.
- Los autores externos a la Facultad de Ciencias Espaciales deben entregar el manuscrito vía email al correo electrónico: revista.cespaciales@unah.edu.hn.

Fecha de última actualización: 4 de diciembre de 2024.

Fecha de aprobación: 4 de diciembre de 2024.



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS



Facultad de Ciencias Espaciales
Universidad Nacional Autónoma de Honduras
Ciudad Universitaria, Edificio K-2
Bulevar Suyapa, Tegucigalpa MDC, Honduras
Teléfono: (504) 2216-3034
Correo electrónico: revista.cespaciales@unah.edu.hn
<http://faces.unah.edu.hn/revistace/> y
<https://www.camjol.info/index.php/CE/index>