



Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de
Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

Técnicas de validación y de mejora de los pronósticos
por ensamble de concentración de cenizas volcánicas

Tesista: Micaela Clara Maurizi

Director: Dra. María Soledad Osoreo

Co-Director: Dr. Leonardo Mingari

A mi papá Guillermo y mi mamá Laura

Agradecimientos

A mi país, **Argentina**, porque me dio todas las oportunidades que me trajeron hasta acá.

A la **Universidad de Buenos Aires**, por haberme abierto las puertas a un universo de conocimiento que, sin saberlo, se convertiría en una parte esencial de mi identidad. Agradezco profundamente la formación recibida, y el recordatorio constante de que el conocimiento es un derecho y una herramienta de transformación.

A la **Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN-UBA)**, por ser mi segundo hogar durante estos años, por ofrecerme una educación gratuita y de excelencia, que transformó profundamente mi forma de ver el mundo y redefinió mi manera de pensar.

En particular, expreso mi sincero agradecimiento al **Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO)**, por brindarme el espacio para crecer, no solo en lo académico, sino, sobre todo, en mi desarrollo personal y profesional. Gracias por enseñarme a abordar los problemas con una mirada científica y por forjar mi criterio.

Al **Servicio Meteorológico Nacional**, por su enseñanza sobre la importancia de la ciencia aplicada al servicio de la sociedad. Asimismo, agradezco que hayan puesto a disposición los recursos computacionales fundamentales para realizar las simulaciones numéricas que sustentan esta investigación.

A mis directores, la **Dra. Soledad Osoreo**, por ser quien me introdujo en este campo y por su constante guía y apoyo, tanto académico como humano. Su confianza y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. A ella, mi más sincero agradecimiento por enseñarme no solo ciencia, sino también los principios que marcaron mi formación. En la misma línea, agradezco también al **Dr. Leonardo Mingari** por sus valiosas contribuciones, por su dedicación y apoyo, sin los cuales esta tesis no habría alcanzado el resultado que hoy tiene. A ambos, gracias por contagiarme su pasión y por guiarme en este proceso.

Al **Dr. Michael Pavolonis**, de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y a **Justin Sieglaff**, de la University of Wisconsin, Estados Unidos, por su generosa colaboración al proporcionar el reprocesamiento de la estimación de carga de masa a partir de los datos de VOLCAT para el evento estudiado en esta tesis.

A los miembros del jurado, la **Dra. Claudia Campetella**, la **Dra. María Eugenia Dillon** y la **Dra. Romina Mezher**, por aceptar la propuesta y contribuir a la evaluación de este trabajo, así como por las valiosas enseñanzas que me brindaron a lo largo de este camino, tanto en lo profesional como en lo académico.

A **mis padres** y a **mi hermana**, por su incondicional apoyo y confianza en cada una de mis decisiones, por estar siempre a mi lado sin condicionar mis pasos, y por creer en este proyecto tanto como yo. A **Ciro**, mi fiel compañero, que estuvo siempre cerca durante las largas horas de estudio, brindándome su presencia, consuelo y cariño.

A **Agustín**, por su constante presencia y apoyo en cada decisión, en cada desafío, en cada paso de este camino. Gracias por confiar en mí incluso cuando yo misma dudaba, por acompañarme en las tristezas y desilusiones, y por celebrar junto a mí cada conquista y logro alcanzado.

A **Juan**, con quien compartí este camino desde el primer día de la carrera, caminando siempre a mi lado y convirtiéndose en un amigo para toda la vida. Gracias por la palabra justa en el momento preciso y por ser una constante fuente de apoyo en cada etapa de este recorrido.

A **Agus y Popi**, por tantos años de amistad verdadera. Nos encontramos en esta facultad y crecimos juntas. Gracias por compartir la carrera, congresos, viajes, preocupaciones y alegrías, y por estar siempre.

A **Manu**, mi primera amiga, por nuestra amistad inquebrantable, que nació en tardes de verano en Villa Luro, cuando fantaseamos con el futuro y nos animamos a soñar con estudiar en la UBA. Gracias por estar presente en toda mi vida, sin falta.

A mis amigos de la infancia, **Cami, Ivi, Chani y Meli**, por ser parte fundamental de mi crecimiento y por recordarme siempre lo que importa. Gracias por los momentos compartidos, que aún resuenan en mi vida.

A mis amigos de la carrera, en especial a **Antu**, con quienes compartí numerosos días de estudio entre los Pabellones 1 y 2, salidas al bar de deportes, semanas de la ciencia y fiestas en Exactas. Muchas de las ideas que están acá escritas las comprendí gracias a que las pensé y estudié junto a ellos a lo largo de todo este camino.

A **Tavo y Juli**, por compartir viajes en momentos necesarios, las reflexiones y el amor por nuestra facultad. Que la vida nos siga encontrando juntos.

Al **Taller de Arte López de Carlo**, y especialmente a mi profesora **Belén**, por haberme ofrecido un refugio de creatividad y reflexión, un espacio que me permitió desconectar, expresarme y encontrar equilibrio en momentos clave de la carrera. Fue fundamental para llegar a este momento entera.

A **mi familia**, mis tíos y tías, por su apoyo constante y por acompañarme siempre, compartiendo mi felicidad.

A **Dios**, por nunca dejarme en banda.

Resumen

La dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, ya sea por erupciones o por la removilización de material depositado, representa una amenaza para la seguridad aérea. En América del Sur, la actividad volcánica asociada a la Cordillera de los Andes inyecta frecuentemente ceniza en el espacio aéreo, lo que requiere pronósticos precisos por parte de los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC). Tras la erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010, los procedimientos para gestionar la presencia de material volcánico en el espacio aéreo europeo cambiaron, adoptando criterios basados en pronósticos de concentración en lugar de la anterior política de tolerancia cero. Este enfoque está siendo replicado por la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI), que planea implementar en 2025-2026 la Información Cuantitativa de Cenizas (QVA), basada en pronósticos por ensambles.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) opera el VAAC de Buenos Aires, utilizando actualmente el modelo de dispersión FALL3D de manera determinística, acoplado al modelo meteorológico Global Forecasting System (GFS). Para cumplir con los requerimientos de la OACI, el VAAC Buenos Aires implementará los pronósticos numéricos de dispersión de ceniza por ensambles mediante el modelo FALL3D. Para garantizar la calidad de estos pronósticos, es fundamental contar con una estrategia de calibración y verificación de los modelos de dispersión.

Esta tesis tiene como objetivo definir una estrategia para calibrar y verificar los ensambles generados por el VAAC de Buenos Aires, utilizando productos satelitales para la detección de ceniza y la estimación de su carga de masa. Los resultados contribuirán a mejorar la seguridad aérea mediante la provisión de pronósticos QVA más precisos, que permitirán a los operadores de aeronaves tomar decisiones en función de la susceptibilidad de sus motores y el tiempo de exposición a la ceniza volcánica.

Palabras clave: Ceniza volcánica, VAAC, Información cuantitativa de cenizas volcánicas, Modelado numérico, Ensamblés.

Índice

Resumen	1
Índice	2
Índice de Figuras	3
1. Introducción	5
2. Datos y Metodología	9
2.1 El modelo de dispersión y depósito de ceniza FALL3D-8.2.....	9
2.2 Ensamblajes y Post procesamiento FALL3D.....	12
2.3 Resultados del Modelo FALL3D.....	13
2.4 Datos Satelitales.....	15
2.5 Métricas.....	18
3. Caso de estudio: Erupción volcán Ubinas 2019	23
3.1 Cronología del Evento	26
3.2 Situación Sinóptica.....	28
3.3 Configuración Experimental	34
4. Resultados	38
4.1 Discusiones.....	48
5. Conclusiones	52
Bibliografía	54

Índice de Figuras

1. Distribución de los 9 Centros de Avisos de Ceniza Volcánica alrededor del mundo.

2. Perfil vertical del flujo de masa según un perfil Suzuki (en rojo) y según la parametrización Top Hat (en azul).

Tabla 1. Resumen de las variables modeladas en FALL3D y sus aspectos relevantes en términos de dimensión y distribución de partículas

Tabla 2. Resumen de los productos satelitales utilizados para la detección y caracterización de cenizas volcánicas.

3. Tabla de contingencia para carga de masa observada versus modelada, donde TP= Verdaderos positivos (aciertos), FP= Falsos Positivos (Falsa alarma), FN= Falsos Negativos (perdidos) y TN =Verdaderos Negativos.

4. (a) Mapa del Perú, con un círculo rojo que señala la ubicación del volcán Ubinas. (b) Volcán Ubinas. **Fuente:** Instituto Geofísico del Perú.

5. Columna eruptiva del volcán Ubinas el 19 de julio de 2019. **Fuente:** Instituto Geofísico del Perú

6. Pluma de cenizas del volcán Ubinas el 19 de julio de 2019 vista desde el satélite TERRA. **Fuente:** Instituto Geofísico del Perú

7. Tiempo significativo registrado por las estaciones meteorológicas de superficie para las 12:00 UTC del 19 de julio de 2019. **Fuente:** OGIMET

8. VAGs emitidos por el VAAC Buenos Aires para la erupción del volcán Ubinas el día 19 de julio del 2019. Polígonos de: (a) observación a las 11:30 UTC (marrón), pronóstico a 6 (verde) 12 (celeste) y 18 horas (magenta); (b) observación a las 15:30 UTC(marrón), pronóstico a 6 (verde), 12(celeste) y 18 horas (magenta).

9. Campos de viento (m s^{-1}) y altura geopotencial (m) en 100, 250 y 550 hPa para el 19 de julio 2019 a las 9:00 UTC (a), (d), (g), 13:00 UTC (b), (e), (h) y 16:00 UTC (c), (f), (i).

10. Temperatura de tope en $10.3 \mu\text{m}$ estimada con datos del satélite GOES-16 (arriba) y Ash RGB (abajo) para el 19 de julio del 2019 a las (a) 9:00 y (b) 13:00 UTC.

11. Temperatura de tope en $10.3 \mu\text{m}$ estimada con datos del satélite GOES-16 (arriba) y ash RGB (abajo) para el 19 de julio del 2019 a las (a) 16:00 y (b) 19:00 UTC.

Tabla 3. Configuración de los ensambles generados y sus respectivas perturbaciones.

12. Carga de masa de ceniza volcánica VOLCAT estimada utilizando datos del GOES-16 a las 19:00 UTC.

13. Carga de masa de los miembros del ensamble Simulación A válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

14. Carga de masa de los miembros del ensamble Simulación B válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

15. Carga de masa de los miembros del ensamble Simulación C válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

16. FMS ordenado por miembro para las tres simulaciones A, B y C.

17. FMS en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

18. FAR en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

19. POD en función de las alturas de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

20. (a) RMSE en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones y (b) RMSE con foco para apreciar el mínimo, válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

1. Introducción

Las erupciones volcánicas explosivas inyectan ceniza en la atmósfera, generando diversos impactos a nivel global, tanto en el ambiente como en distintas industrias, siendo la aviación una de las más afectadas. Las cenizas volcánicas, compuestas por fragmentos de roca, minerales y vidrio volcánico, pueden desplazarse a través de la atmósfera por miles de kilómetros, atravesando rutas aéreas y poniendo en riesgo la seguridad de las aeronaves (Clarkson et al., 2016). Bajo ciertas condiciones, las partículas de cenizas volcánicas pueden dañar gravemente los motores de las aeronaves, poniendo en peligro tanto a las tripulaciones como a los pasajeros (Guffanti et al., 2009). Para garantizar la seguridad en los vuelos la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, por sus siglas en inglés) creó el Programa de Vigilancia de Volcanes en Aerovías Internacionales y designó a nueve Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAACs, por sus siglas en inglés) encargados de monitorear las emisiones de ceniza volcánica dentro de sus regiones de responsabilidad (Fig. 1). La función principal de los VAACs es monitorear la presencia de ceniza volcánica en la atmósfera e implementar y operar sistemas de pronóstico numérico para estimar la futura dispersión de ceniza en la atmósfera para brindar información a la aeronavegación para la toma de decisión (Osores, 2018).

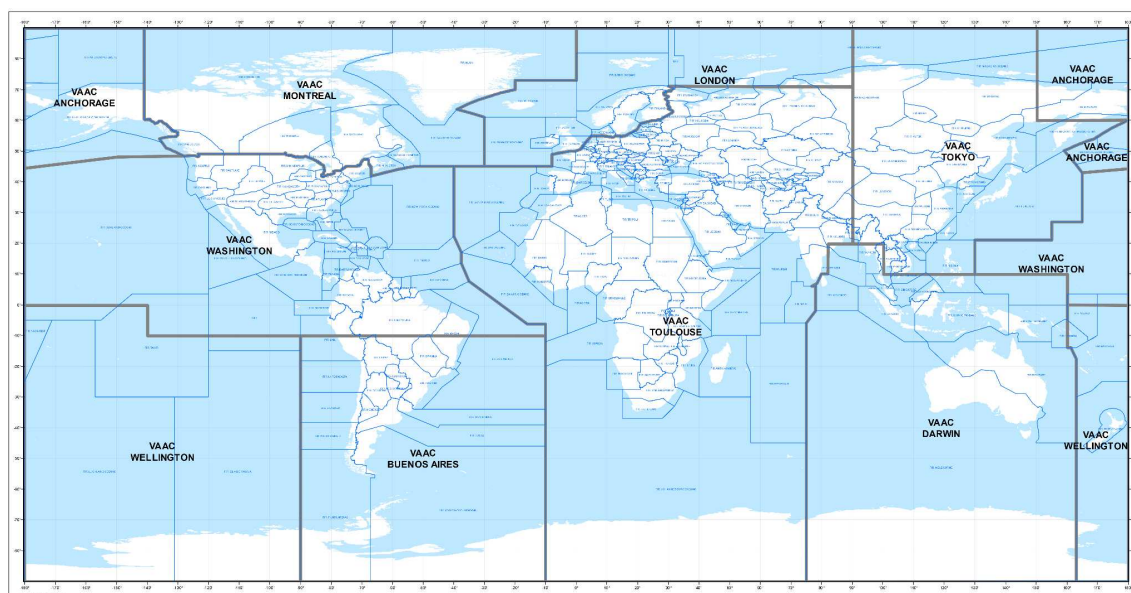


Figura 1. Distribución de los 9 Centros de Avisos de Ceniza Volcánica alrededor del mundo.

Los VAACs emiten avisos a través de dos tipos de mensajes: el Volcanic Ash Advisory (VAA), que es un texto informativo, y el Volcanic Ash Graphic (VAG), que proporciona un mapa gráfico (OACI, 2016). Estos mensajes incluyen detalles sobre la ubicación del volcán que genera la pluma de ceniza, el área afectada por la ceniza, los pronósticos de dispersión de la pluma a 6, 12 y 18 horas, y la fuente de los datos de observación. Ambos tipos de mensajes deben ser actualizados al menos cada seis horas.

Hasta abril de 2010 se implementaron a nivel global estrictos protocolos para evitar vuelos en zonas contaminadas por ceniza volcánica (Clarkson et al., 2016), pero la erupción del volcán Eyjafjallajökull, en Islandia, en 2010 que provocó el cierre del espacio aéreo europeo por varios días, con la cancelación de más de 100 mil vuelos, y grandes pérdidas económicas (Alexander, 2013) impulsó evaluar la posibilidad de volar en zonas con baja concentración de ceniza. Para ello, las autoridades aeronáuticas europeas, junto con los fabricantes de motores, revisaron el criterio de "tolerancia cero" que imperaba hasta entonces. Tras evaluar el impacto de motores que tuvieron encuentros con ceniza y utilizando modelado numérico de dispersión en colaboración con el Servicio Meteorológico de Inglaterra, el fabricante de motores Rolls Royce introdujo umbrales de concentración de cenizas a fin de definir rangos para las operaciones seguras (Clarkson et al., 2016; Beckett et al., 2020).

A partir de allí en Europa y el Atlántico Norte, por acuerdo regional (OACI, 2024), se permitió la provisión de material suplementario de concentración de ceniza junto con los productos mandatorios (VAA/VAG). Para ello, los VAACs de Londres y Toulouse comenzaron a generar pronósticos numéricos de concentración de ceniza volcánica, complementando los tradicionales avisos de ceniza. Este enfoque permitió a las aerolíneas tomar decisiones basadas en los umbrales de impacto conocidos, cumpliendo con los requisitos que cada Estado imponía, evitando cancelaciones masivas de vuelos y reduciendo el impacto económico, garantizando aún así la seguridad.

El pronóstico de dispersión de cenizas se ha basado históricamente en modelos numéricos, que simulan la trayectoria de las partículas volcánicas en la atmósfera, considerando factores como la velocidad y dirección del viento, la altura de la columna eruptiva y la granulometría de las cenizas. Sin embargo, uno de los mayores desafíos en este tipo de modelos es la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada, particularmente en la representación del término fuente (Engwell et al., 2024). Este problema ha llevado al desarrollo de modelos de

pronóstico por ensambles, que consisten en realizar múltiples simulaciones con pequeñas variaciones en los parámetros de entrada, permitiendo así cuantificar la incertidumbre y generar pronósticos más robustos (Degruyter y Bonadonna, 2012).

La Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) ha trabajado para avanzar hacia la provisión de "Información Cuantitativa de Cenizas" (QVA, por sus siglas en inglés), un servicio que permitirá ofrecer pronósticos probabilísticos basados en ensambles, mejorando significativamente la calidad de la información disponible para la toma de decisiones en la aviación civil (OACI, 2023).

En VAAC Buenos Aires, se utiliza el modelo de dispersión FALL3D, que ha sido implementado para generar pronósticos determinísticos de dispersión de cenizas en su área de responsabilidad (Osores, 2018). En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se trabaja en el desarrollo de pronósticos de concentración por ensambles desde hace varios años. Osores (2018) desarrolló el primer sistema de pronóstico por ensambles utilizando el modelo FALL3D e implementando asimilación de datos sintéticos en un área cercana a la fuente de emisión. Posteriormente, Mingari et al. (2022) expandieron las técnicas de asimilación y las implementaron utilizando observaciones reales. Actualmente, el SMN trabaja en el desarrollo del sistema para producir la Información QVA que comenzará a ser provista a fines del 2026 en el VAAC Buenos Aires.

En este contexto, este trabajo se propone como objetivo desarrollar un sistema que optimice el desempeño de los ensambles de dispersión de cenizas volcánicas mediante el uso de observaciones satelitales y métricas. Este sistema tiene la finalidad de mejorar la precisión de los futuros pronósticos de información QVA que serán emitidos por el VAAC Buenos Aires.

La Información QVA será un producto clave en la toma de decisiones para la aviación civil, que permitirá a los operadores contar con datos probabilísticos sobre la dispersión y concentración de ceniza en el espacio aéreo para evaluar riesgos y planificar rutas de vuelo en áreas contaminadas con bajas concentraciones de ceniza.

Este trabajo de tesis se estructura de la siguiente forma, en la sección 2, se expondrá la metodología empleada para la simulación de la dispersión de ceniza volcánica, detallando los datos y las herramientas que se utilizarán en el proceso. La sección 3 estará dedicada al análisis del caso de estudio de la erupción del volcán Ubinas en 2019, abordando la

cronología del evento y la configuración experimental que se adoptará. En la Sección 4, se presentarán los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, seguidos de un análisis y una discusión crítica de los mismos. Finalmente, la Sección 5 culminará el trabajo con las conclusiones derivadas del estudio.

2. Datos y Metodología

En esta sección se describe el modelo utilizado, los datos observados y las herramientas de verificación del desempeño mediante el uso de datos satelitales y métricas.

2.1 El modelo de dispersión y depósito de ceniza FALL3D-8.2

Para la realización de este trabajo se utilizó el modelo de dispersión FALL3D (Folch et al., 2021), un modelo Euleriano tridimensional que resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación (ec.1) por medio de diferencias finitas, permitiendo simular el transporte y depósito de partículas y aerosoles volcánicos. El modelo agrupa a las partículas en diferentes bins según sus propiedades (tamaño, densidad y esfericidad) y asume que todas las partículas dentro de una clase tienen la misma velocidad de sedimentación. Además, al considerar las clases estacionarias, resuelve de forma independiente la ecuación para cada tamaño.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} + (W - W_s) \frac{\partial C}{\partial Z} = -C \nabla \cdot (U, V, W) + C \frac{\partial W_s}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\rho_* K_X \frac{\partial C}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\rho_* K_Y \frac{\partial C}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\rho_* K_Z \frac{\partial C}{\partial Z} \right) + S, \quad ec.1$$

La ecuación 1, describe cómo varía la concentración C (kg m^{-3}) de las partículas, influenciada por la advección de las partículas a través del viento tridimensional (U , V , W) y su sedimentación, con una velocidad terminal de caída W_s , y donde K_X , K_Y , K_Z son los coeficientes de difusividad turbulenta, ρ_* es la densidad del aire y S es el término fuente. Para su resolución, se emplea un sistema de coordenadas siguiendo el terreno ($X=mx$; $Y=my$; $Z=z$), donde m es el factor de escala de mapa y $Z=z-h(x,y)$, con $h(x,y)$ la altura de la topografía.

La concentración también puede ser modificada por la divergencia tridimensional del viento, los cambios en la velocidad de sedimentación vertical, la difusión turbulenta en direcciones

horizontal y vertical, y un término fuente que representa tanto el flujo de ceniza desde la columna eruptiva hacia la atmósfera como la resuspensión de ceniza depositada en la superficie.

Con respecto al término fuente, es posible parametrizar la forma que tomará el perfil de emisión de cuatro maneras distintas: 1) Fuente puntual, 2) Perfil tipo hongo (Fig. 2) (Suzuki, 1983; Pfeiffer et al., 2005), 3) Sombrero o Top Hat (Fig. 2), y 4) Modelo de pluma 1-D (Folch et al., 2016 b). Por otro lado, los esquemas de flujo de masa (MFR) disponibles son: 1) Estimate-Mastin (Mastin et al., 2009), 2) Estimate-Degruyter (Degruyter y Bonadonna, 2012), y 3) Estimate-Woodhouse (Woodhouse et al., 2013). El primer esquema se basa en ajustes empíricos que relacionan el flujo de masa con la altura de la columna eruptiva. En cambio, los dos últimos esquemas no solo consideran la altura de la columna eruptiva, sino también las condiciones meteorológicas, donde un viento más intenso requiere un mayor flujo de masa para alcanzar una altura específica (Osores, 2018).

El modelo calcula la velocidad de sedimentación de las partículas considerando parámetros como el diámetro, la densidad y la forma de cada clase de partículas, así como las condiciones atmosféricas. Para representar el coeficiente de arrastre, ofrece varios esquemas: Arastoopour (1982), Ganser (1993), Wilson (1979) y Dellino (2005). Además, cuenta con un esquema de sedimentación húmeda que incorpora la tasa de precipitación modelada. Sin embargo, este esquema no se utiliza frecuentemente en pronósticos operativos debido a la inexactitud de los modelos numéricos meteorológicos en predecir la precipitación.

Este modelo es ampliamente utilizado en el pronóstico de dispersión de cenizas volcánicas de manera operativa. A partir de su versión 8.1, el modelo FALL3D ofrece la capacidad de generar pronósticos probabilísticos a través de ensambles, permitiendo conocer el rango de escenarios posibles de dispersión ante la incertidumbre en el término fuente y las condiciones meteorológicas.

El modelo FALL3D requiere datos de entrada tanto meteorológicos como volcánicos. Desde el punto de vista de información vulcanológica requiere datos sobre la ubicación geográfica del volcán (altura y coordenadas del cráter) y detalles propios de la erupción, como la distribución de tamaños de partículas y las características de cada clase de partículas (densidad y forma), además del perfil de flujo de masa (MFR) total y por clase. Se puede definir la distribución de tamaños de partículas y el perfil de MFR, o bien usar las

parametrizaciones del modelo indicando en el archivo de configuración la parametrización elegida. En el caso de la granulometría se debe indicar si se asume una distribución Gaussiana, Bigaussiana, Weibull, Biweibull, Personalizado o Estimado, la cantidad de clases, el rango de tamaños (con un umbral máximo de unos pocos centímetros), la media y el desvío estándar (dos valores para la Bigaussiana), así como los rangos de densidad y esfericidad.

La información meteorológica requerida abarca datos del dominio de integración, como la distribución tridimensional del viento y la temperatura, además de la velocidad de fricción, entre otros. Estas variables pueden derivarse de modelos de pronóstico numérico que operan de forma integrada, tales como el Global Forecasting System (GFS) (NCEP, 2015), el Integrated Forecasting System (IFS) (ECMWF, 2020) y el Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock, W. C., et al., 2008).

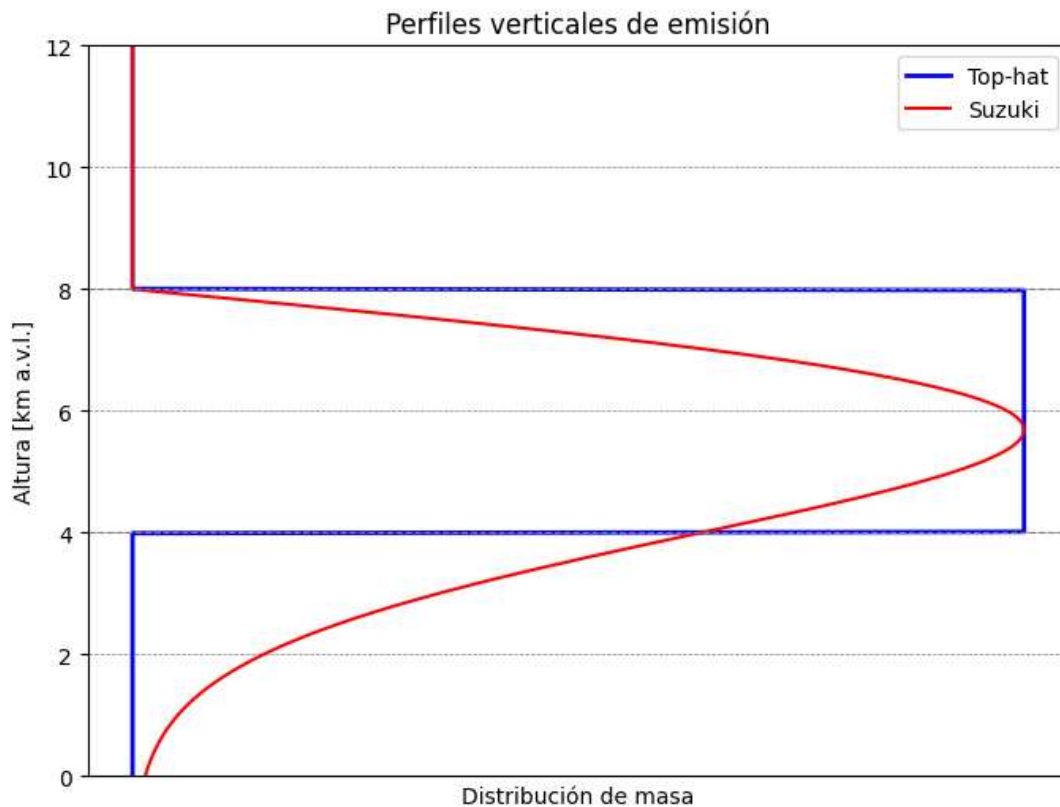


Figura 2: Perfil vertical del flujo de masa según un perfil Suzuki (en rojo) y según la parametrización Top Hat (en azul).

2.2 Ensamblajes y Post procesamiento del modelo FALL3D

Los pronósticos probabilísticos se calculan a partir de ensambles de la dispersión de cenizas volcánicas. Los ensambles permiten abordar la incertidumbre asociada a los pronósticos, proporcionando una gama de posibles escenarios que reflejan la variabilidad en las condiciones y parámetros del modelo. Los ensambles, se fundamentan en la premisa de que el modelo de dispersión opera bajo una distribución de probabilidad que captura la incertidumbre en las condiciones iniciales y en los parámetros del modelo, lo cual permite evaluar las probabilidades de los posibles estados futuros del sistema (Willks, 1995). La estimación completa de la evolución de esta distribución de probabilidad a lo largo del tiempo es muy costosa desde el punto de vista computacional. Como alternativa, los pronósticos por ensambles utilizan muestras finitas de las distribuciones de probabilidad que describen el estado inicial del sistema. Estas muestras generan un conjunto de posibles escenarios futuros, proporcionando una representación de la distribución de probabilidad de los estados futuros del sistema (Osores, 2018). Para que esta técnica sea efectiva, es importante seleccionar adecuadamente los elementos de la muestra, garantizando que el ensamble refleje la incertidumbre asociada a los pronósticos.

El modelo FALL3D, permite utilizar ensambles de modelos meteorológicos así como la perturbación de condiciones iniciales utilizando un muestreo Hipercúbico Latino (Folch et al., 2021). El archivo de configuración ofrece diversas opciones para definir estas perturbaciones. Entre los parámetros que pueden ser perturbados, se encuentra la altura de la columna eruptiva, que puede ser perturbada de forma absoluta o relativa en un rango específico y permite determinar distribución de probabilidad como uniforme o Gaussiana. También es posible perturbar el flujo de masa, el momento de inicio y la duración de la emisión, permitiendo configuraciones que reflejan variaciones tanto en el inicio como la evolución temporal de la erupción.

Adicionalmente, el modelo incluye opciones para perturbar características de la emisión, si se utiliza el esquema de perfil de emisión tipo Top-Hat es posible perturbar el espesor del tope de la nube, si se utiliza el esquema del perfil de emisión tipo Suzuki es posible perturbar la forma del perfil perturbando los coeficientes que regulan su forma. También permite perturbar las características de la distribución de tamaños de partículas como también si se incluye el proceso de agregación de partículas es posible perturbar el diámetro de los

agregados. Por otro lado, también permite la perturbación de las plumas de ceniza y nubes de ceniza incorporadas mediante la inserción de datos satelitales, permitiendo ajustar tanto su altura como su grosor.

En general, para definir las perturbaciones el modelo requiere información sobre el rango del parámetro a perturbar, el tipo de perturbación (absoluto o relativo) y la función de distribución de probabilidad respectiva (uniforme o Gaussiana).

A partir de la configuración previa se generan los ensambles del FALL3D, creando múltiples simulaciones del modelo, cada una con el conjunto de parámetros seleccionados perturbados. Cada simulación del ensamble (miembro) representa un posible estado de la pluma de dispersión de cenizas, considerando la incertidumbre y variaciones en los datos y en los parámetros seleccionados.

Una vez que se han generado los ensambles, se realiza un postprocesamiento que permite obtener la estimación de la concentración 3D de cenizas para cada miembro del ensamble y para cada instante temporal junto con estadísticos del ensamble. Entre los estadísticos calculados durante el postprocesamiento se encuentran la media y el desvío estándar de la concentración tridimensional de ceniza, así como la probabilidad de superar ciertos umbrales de concentración y el cálculo de percentiles. Estos parámetros ayudan a interpretar los resultados del ensamble y a evaluar el rango de posibles impactos de la erupción. Por ejemplo, la media de la concentración de ceniza proporciona una estimación central, mientras que el desvío estándar indica la variabilidad en las predicciones. La probabilidad de superar umbrales específicos puede ser utilizada para evaluar la exposición a diferentes niveles de peligrosidad de ceniza en diferentes regiones.

2.3 Resultados del Modelo FALL3D

El modelo FALL3D proporciona una serie de resultados clave que permiten una evaluación detallada de la dispersión de cenizas volcánicas. Entre los productos generados por el modelo se encuentra:

Distribución Tridimensional de la Concentración de Ceniza: Uno de los principales resultados del modelo FALL3D es la distribución tridimensional de la concentración de ceniza volcánica en la atmósfera. Esta representación permite conocer la distribución de la ceniza en la vertical y su extensión horizontal. La información tridimensional es importante para poder evaluar el impacto de los umbrales de concentración que son peligrosos para la aviación en diferentes niveles de la atmósfera. En particular, este modelo permite que el resultado de concentración sea guardado en niveles verticales Z o niveles de vuelo (niveles verticales de referencia para la aeronáutica). La información tridimensional es esencial para comprender cómo se propaga la ceniza en diferentes altitudes, mientras que los niveles de vuelo proporcionan datos específicos para la gestión de la aviación.

Carga de Masa Total y/o por clases de tamaños de partículas:

El modelo calcula la carga de masa total de ceniza, que representa la integración vertical de la masa de ceniza suspendida en la atmósfera y proporciona una vista en plano de la pluma de ceniza.

El modelo también ofrece el resultado de carga de masa para cada clase de tamaños de partículas y esto puede ser útil para la evaluación de la fracción fina de cenizas cuando realizan simulaciones con una distribución de tamaños de partículas completa.

La carga de masa de la fracción fina de ceniza se suele utilizar para realizar comparaciones con la detección de ceniza a través de datos satelitales. Para ello se suele considerar el límite de detección satelital de ceniza que ronda los 0.1 a 0.2 g m⁻² (Prata y Prata, 2012), en condiciones de cielo despejado, es decir sin nubes meteorológicas. Al comparar estos datos con imágenes satelitales, es posible verificar la precisión de las predicciones del modelo y ajustar las estrategias de modelado.

Carga de masa depositada total o por clases de tamaños de partículas: El modelo ofrece como resultado la cantidad de material depositado en superficie total o por tamaños de partículas. Este resultado suele ser de interés para la evaluación del impacto en superficie y es un resultado importante en caso de querer procesar el modelo en el modo de resuspensión.

La combinación de estos productos del modelo FALL3D permite una evaluación integral de la dispersión y el depósito de la cenizas volcánicas. Estos resultados permiten obtener información relevante para la toma de decisiones para mitigar posibles impactos.

Variable modelada	Aspectos relevantes
Distribución tridimensional de la concentración de ceniza	Representación 3D de la concentración de ceniza en la atmósfera, con información en niveles verticales o de vuelo.
Carga de masa total y por tamaño de partículas	Representación 2D de la masa en suspensión integrada verticalmente, con opción de discriminar por tamaños de partículas.
Carga de masa depositada total o por tamaño de partículas	Representación 2D de la cantidad de ceniza acumulada en superficie, diferenciable por clases de partículas.

Tabla 1. Resumen de las variables modeladas en FALL3D y sus aspectos relevantes en términos de dimensión y distribución de partículas

2.4 Datos Satelitales

La ceniza volcánica tiene una firma espectral específica, lo que permite realzar su presencia en comparación con nubes meteorológicas y otras superficies mediante el uso de diferencias de bandas del espectro electromagnético. En esta sección, se describen los productos satelitales empleados en esta tesis para la detección, estimación de la altura del tope y cuantificación de la carga de masa de la pluma de ceniza. Todos los productos analizados provienen de datos obtenidos por el instrumento ABI (Advanced Baseline Imager) del satélite GOES-16.

Diferencia de temperatura de brillo

La Diferencia de Temperatura de Brillo (BTD, por sus siglas en inglés) es una técnica esencial para la detección y análisis de cenizas volcánicas en imágenes satelitales, desarrollada por Prata (1989 a, b). Este algoritmo compara las temperaturas de brillo de dos bandas infrarrojas, generalmente haciendo la resta de la temperatura de brillo de la banda de 10.3 μm menos la de 11 μm , para distinguir la respuesta espectral de la ceniza volcánica

respecto a nubes meteorológicas y otras superficies. Las diferencias negativas suelen indicar la presencia de ceniza, mientras que las positivas sugieren nubes meteorológicas y otras superficies.

La BTM permite identificar y analizar la extensión horizontal de la pluma de ceniza, separándola de otras nubes. Sin embargo, no sirve para estimar la altura de la pluma. Para la estimación de la altura de la pluma, se usó la temperatura de brillo de la banda de $10.3\text{ }\mu\text{m}$ combinada a información sobre el perfil atmosférico. Además, el uso de estas bandas en combinación con la diferencia de la temperatura de brillo de la banda de $12.3\text{ }\mu\text{m}$ respecto de $10.3\text{ }\mu\text{m}$, permite generar imágenes en falso color que destacan áreas con características térmicas asociadas a cenizas volcánicas, este producto se conoce como Ash RGB.

Clear Sky Mask

El producto Clear Sky Mask (CSM) es una herramienta clave para identificar áreas despejadas y cubiertas por nubes, generado utilizando datos tomados por el sensor ABI del satélite GOES-16. Este algoritmo analiza la radiación en diversas bandas del espectro electromagnético, incluyendo bandas visibles e infrarrojas, y clasifica cada píxel en dos categorías: sin nube (valor 0) o con nube (valor 1) (NOAA/NESDIS, 2020).

El algoritmo presenta limitaciones, ya que en caso de nubes de ceniza densas, los píxeles pueden clasificarse como "con nube". Asimismo, si la pluma de ceniza se encuentra debajo de una nube meteorológica, el algoritmo también la clasifica como nube. Por lo tanto, los píxeles clasificados como "con nube" se consideraron en esta tesis como píxeles dudosos de contener ceniza volcánica. Esto resalta la importancia de usar este producto en conjunto con otros algoritmos para minimizar errores.

La resolución del Clear Sky Mask es de 2 km para las regiones de cobertura Full Disk, CONUS (Continental United States) y Mesoescala. Los datos están disponibles tanto para condiciones diurnas como nocturnas, lo que permite un monitoreo continuo de las condiciones atmosféricas y la dispersión de cenizas a lo largo de todo el día.

Temperatura de brillo de tope

La temperatura de brillo en la banda de $10.3\text{ }\mu\text{m}$ fue utilizada para estimar la altura del tope de la pluma de ceniza volcánica. Este método se basa en la correlación entre la temperatura

de brillo estimada con los datos satelitales y los datos atmosféricos obtenidos de modelos numéricos, que permiten asociar la temperatura a niveles específicos de presión y altura. La banda de 10.3 μm es particularmente útil para este propósito debido a su sensibilidad a las emisiones térmicas de las capas superiores de la atmósfera (SMN, 2022)

Se utilizaron estos datos para determinar la altura de la pluma como datos de entrada para el modelo FALL3D, que requiere información sobre la altitud para simular la dispersión de cenizas volcánicas. El uso combinado de la temperatura de brillo y otros productos satelitales permiten una caracterización más detallada de la pluma volcánica.

Carga de masa satelital de VOLCAT

El sistema de Monitoreo de Nubes Volcánicas, conocido como *Volcanic Cloud Analysis Toolkit* (VOLCAT), es una herramienta avanzada desarrollada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) en colaboración con el Centro de Investigaciones sobre la Atmósfera y el Sistema de Satélites de la Universidad de Wisconsin (CIMSS, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies). Este sistema utiliza datos satelitales tanto geoestacionarios como polares para estimar la carga de masa de ceniza volcánica, proporcionando información crítica para el monitoreo y análisis de estos eventos. VOLCAT aplica algoritmos avanzados de detección de objetos, que integran múltiples bandas espectrales, con el propósito de identificar y caracterizar la presencia de ceniza en la atmósfera. En primer lugar, el sistema detecta las nubes de ceniza y, posteriormente, cuantifica la carga de masa de las partículas presentes (Pavolonis et al., 2013; Pavolonis et al., 2015a, 2015b). Este enfoque permite evaluar propiedades microfísicas y ópticas de las nubes volcánicas, lo que resulta esencial para su seguimiento en tiempo casi real.

La resolución espacial y temporal de los productos generados por VOLCAT depende directamente del satélite que se emplee. En el caso del satélite geoestacionario GOES-16, la resolución espacial de los datos infrarrojos es de aproximadamente 2 km por píxel, y en eventos especiales puede tener una resolución temporal de 5 minutos, lo que facilita el monitoreo continuo de eventos volcánicos. Por otro lado, los satélites de órbita polar, como los equipados con el instrumento VIIRS, ofrecen una mayor resolución espacial, del orden de

cientos de metros, aunque con una menor frecuencia de observaciones debido a la naturaleza de sus órbitas. Esta combinación de satélites geoestacionarios y polares permite a VOLCAT proporcionar una cobertura global con distintos niveles de detalle y frecuencia.

La base de la estimación de la carga de masa de ceniza volcánica en la atmósfera radica en el análisis de mediciones satelitales de radiancia en el espectro infrarrojo. Según Pavolonis et al. (2013), a partir de estas mediciones se derivan parámetros clave como la temperatura radiante, la emisividad y propiedades microfísicas de las partículas de ceniza. Estos parámetros son análogos a los utilizados en la caracterización de nubes cirros, según los estudios previos de Heidinger y Pavolonis (2009) y Heidinger et al. (2010). De las propiedades recuperadas, como la altura radiativa de la nube, el radio efectivo de las partículas, la profundidad óptica y la carga de masa, se obtiene información detallada sobre las nubes volcánicas. Sin embargo, estas estimaciones están sujetas a ciertas suposiciones y condiciones atmosféricas que pueden influir en la precisión de los resultados.

Producto Satelital	Uso
BTD (Diferencia de Temperatura de Brillo)	Detección de ceniza mediante comparación de bandas infrarrojas.
Ash RGB	Destacar áreas con ceniza volcánica mediante imágenes en falso color.
Clear Sky Mask	Identificación de áreas despejadas y con nubosidad meteorológica.
Temperatura de Brillo de Topes	Estimación de la altura del tope de la pluma de ceniza.
Carga de Masa VOLCAT	Cuantificación de la carga de masa de ceniza en la atmósfera.

Tabla 2. Resumen de los productos satelitales utilizados para la detección y caracterización de cenizas volcánicas.

2.5 Métricas

Interpolación y filtrado de datos para la comparación de cargas de masa

Para realizar las comparaciones de la carga de masa estimada con datos satelitales respecto a la carga de masa modelada, primero se tuvo que llevar ambas retículas a la misma referencia, para ello se interpoló de manera lineal la carga de masa modelada a la retícula de la carga de masa observada. Posteriormente para poder realizar la comparación de la carga de masa modelada respecto de la observada se filtraron los píxeles con nubosidad meteorológica, identificados en el Clear Sky Mask como 1, que se consideraron píxeles inciertos ya que podrían tener por debajo de la capa nubosa de ceniza volcánica. Al eliminar los píxeles asociados a nubes meteorológicas, quedaron en ambos conjuntos de datos solamente los puntos con cielo despejado, es decir sin ceniza, y áreas con certeza de presencia de ceniza volcánica.

Para evaluar los resultados de la carga de masa modelada respecto de la carga de masa estimada con los datos satelitales y buscar el conjunto de parámetros óptimos para el ensamble se utilizaron distintas métricas categóricas y cuantitativas. El análisis de estas métricas fue guiado por los principios estadísticos descritos en Wilks (2011).

Métricas categóricas

Las métricas categóricas son útiles para evaluar el desempeño discreto de los predictandos. Aquí para comparar la carga de masa modelada respecto de la observada se considera el límite de detección satelital de ceniza, que típicamente se corresponde aproximadamente al valor de carga de masa de 0.1 g m^{-2} y se generan máscaras de ceniza modelada en cada miembro y máscaras de ceniza observada estimada satelitalmente considerando dicho umbral. La verificación categórica se presenta en una tabla de contingencia de frecuencias absolutas de lo simulado respecto de lo observado. A continuación, se presenta un esquema de la tabla de contingencia, Fig. 3.

		Observado	
		SI	NO
Simulado	SI	TP	FP
	NO	FN	TN

Figura 3: Tabla de contingencia para carga de masa observada versus modelada, donde TP= Verdaderos positivos (aciertos), FP= Falsos Positivos (Falsa alarma), FN= Falsos Negativos (perdidos) y TN =Verdaderos Negativos.

A través de esta tabla de contingencia, es posible calcular diversas métricas que ofrecen información sobre el desempeño del modelo respecto de la observación.

Entre estas métricas derivadas de la tabla de contingencia, la probabilidad de detección (POD, ec. 2) mide la fracción de eventos observados que fueron correctamente simulados. Cuando la extensión de la pluma modelada supera a la pluma observada, el POD tiende a valores cercanos a 1, dado que no penaliza los falsos positivos (es decir, los puntos con ceniza modelada pero con cielo despejado en la observación). Esto puede llevar a una sobreestimación de la capacidad del modelo para detectar adecuadamente la pluma de ceniza.

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{ec.2}$$

Por su parte, la tasa de falsas alarmas (FAR, ec. 3), permite cuantificar la proporción de falsos positivos, es decir, aquellas situaciones en las que el modelo indica la presencia de ceniza en áreas donde no se observa. El valor óptimo del FAR es 0.

$$FAR = \frac{FP}{TP + FP}$$

ec.3

Ante las limitaciones identificadas en el POD, se incluyó la métrica denominada Figure of Merit of Space (FMS, ec.4)(Folch et al., 2022) o también denominada como Threat Score, que consiste en el cociente entre los aciertos respecto de la suma de lo simulado (aciertos más falsos positivos) y la falsos negativos. El valor óptimo del FMS es 1. Esta métrica proporciona una evaluación más equilibrada al considerar tanto los aciertos como los errores (FP y FN), penalizando las sobreestimaciones y subestimaciones del modelo.

ec.4

$$FMS = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

Todas las métricas mencionadas fueron calculadas para cada simulación en distintos instantes de tiempo de pronóstico y para cada miembro del ensamble experimental, con el propósito de identificar la configuración que presenta los valores más adecuados del término fuente.

Métricas cuantitativas

Las métricas cuantitativas son utilizadas para evaluar las diferencias en los valores de carga de masa modelada respecto de la estimada a partir de datos satelitales, que por simplicidad haremos referencia como observada. En particular, se utilizaron el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y el error cuadrático medio como principales indicadores.

El coeficiente de correlación lineal (ec. 5) mide la magnitud de la relación lineal entre la carga de ceniza simulada y la observada. Su valor puede oscilar entre -1 y 1. Un valor de r igual a 1 indica una perfecta relación lineal directa, lo que significa que al aumentar la carga de masa simulada también aumenta de manera proporcional la carga de masa observada. Un valor de r igual a 0 implica que no hay relación lineal aparente entre ambas variables. Los valores de r iguales a -1 reflejan una relación lineal inversa, indicando que las simulaciones y las observaciones varían de manera proporcional pero inversa, es decir cuando una aumenta la otra disminuye.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{ec.5}$$

En este caso, x_i la carga de masa de ceniza simulada y y_i la carga de masa observada, \bar{x} el promedio de los valores simulados, \bar{y} promedio de los valores observados y n el número de observaciones utilizadas (que es el mismo que el número de puntos simulado).

Esta métrica permite determinar si las simulaciones capturan adecuadamente las tendencias espaciales observadas, ya que un alto coeficiente de correlación lineal sugiere un buen ajuste entre el modelo y los datos observados. El coeficiente de correlación, no evalúa directamente la magnitud de los errores, sino únicamente la similitud en los patrones de variación.

El error cuadrático medio (RMSE, ec. 6), evalúa la magnitud promedio de las discrepancias entre las simulaciones y las observaciones. Este indicador se calcula considerando las diferencias absolutas al cuadrado entre los valores observados y modelados, lo que penaliza los errores más grandes. Un RMSE bajo sugiere que las discrepancias entre los datos simulados y observados son pequeñas, lo que indica un buen ajuste del modelo a lo observado. A diferencia del coeficiente de correlación, el RMSE ofrece una visión directa de la magnitud del error, complementando así el análisis del desempeño de la carga de masa modelada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{ec.6}$$

Con x_i la carga de ceniza simulada , y_i la carga de ceniza observada y con n número de observaciones.

3.Caso de estudio: Erupción volcán Ubinas Julio 2019

El volcán Ubinas (Fig. 4), situado en el sur de Perú, es un estratovolcán de los más activos del país (Macedo et al., 2016). Con una altitud de 5672 metros y coordenadas geográficas de 16°22' S y 70°54' O, se encuentra aproximadamente a 75 kilómetros al este de la ciudad de Arequipa (Fig.4). Este volcán forma parte de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes, una de las regiones volcánicas más dinámicas del mundo. A lo largo de la historia, el Ubinas ha mostrado una actividad eruptiva notable, con más de 26 episodios eruptivos registrados en los últimos 500 años, lo que lo convierte en uno de los volcanes más activos de la región andina.

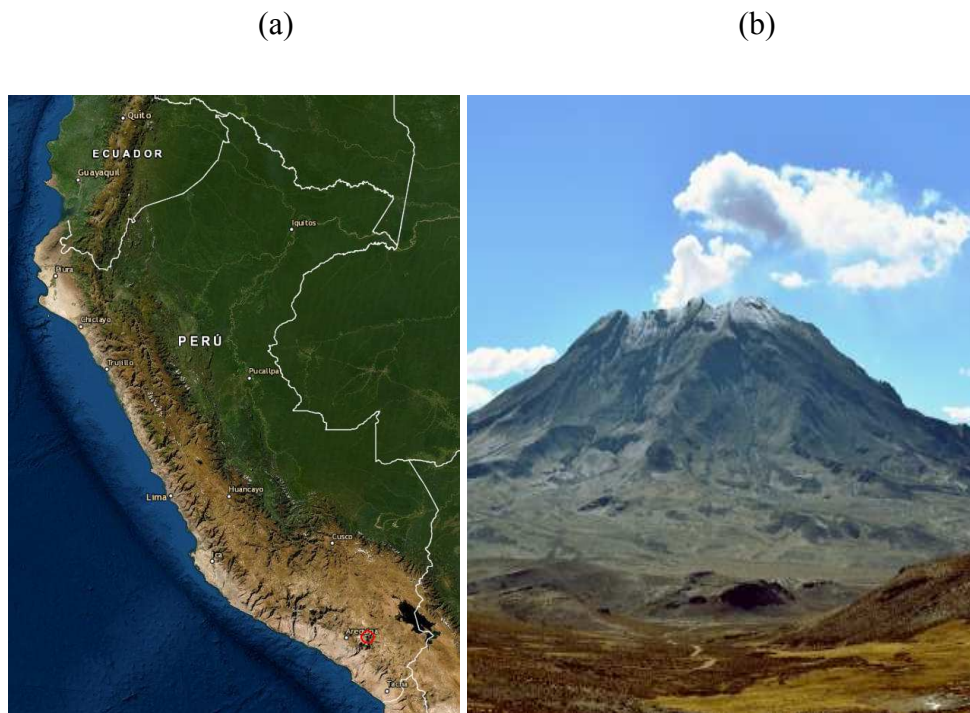


Figura 4: (a) Mapa del Perú, con un círculo rojo que señala la ubicación del volcán Ubinas. (b) Volcán Ubinas. **Fuente:** Instituto Geofísico del Perú.

El Ubinas ha experimentado erupciones de diversa magnitud, con una recurrencia de eventos que varía entre 2 y 6 episodios por siglo. Las erupciones de este volcán han causado daños significativos en las áreas circundantes, afectando la agricultura, la ganadería y, en ocasiones, obligando a la evacuación de comunidades cercanas. El Índice de Explosividad Volcánica

(IEV), que mide la magnitud de las erupciones, ha fluctuado entre 1 y 3 en los episodios más recientes, lo que indica una actividad explosiva de baja a moderada (Rivera, M., 2010).

En julio de 2019, el volcán Ubinas experimentó un evento eruptivo de gran relevancia, cuyas consecuencias impactaron considerablemente a las regiones circundantes. La actividad eruptiva estuvo precedida por un incremento en la sismicidad asociada al volcán, que culminó con intensas explosiones el 19 de julio de ese año (Fig. 5 y Fig.6), fecha en que se registró el evento principal (Instituto Geofísico del Perú [IGP], 2019). Estas erupciones provocaron la inyección de gran cantidad de ceniza en la atmósfera que se dispersó a más de mil kilómetros de distancia, incluyendo el sur de Perú afectando a las regiones peruanas de Moquegua, Puno y Tacna, así como a la ciudad boliviana de La Paz (Fig. 7) y alcanzó San Pablo y Río de Janeiro ubicadas al sudeste de Brasil.

El impacto de este evento volcánico fue significativo, afectando a más de 29,700 personas, 617 instituciones educativas y 20 establecimientos de salud en las zonas cercanas al volcán¹. La caída de cenizas y la interrupción de las actividades cotidianas en las regiones cercanas al volcán generaron serios problemas en la vida diaria de las poblaciones afectadas, además de ocasionar pérdidas en la agricultura y la ganadería, sectores clave para la economía local.

1

<https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/212417-volcan-ubinas-a-un-ano-de-la-explosion-volcanica-mas-grande-registrada-en-el-peru-en-el-siglo-xxi>



Figura 5: Columna eruptiva del volcán Ubinas el 19 de julio de 2019 a las 11:00 UTC.
Fuente: Instituto Geofísico del Perú.

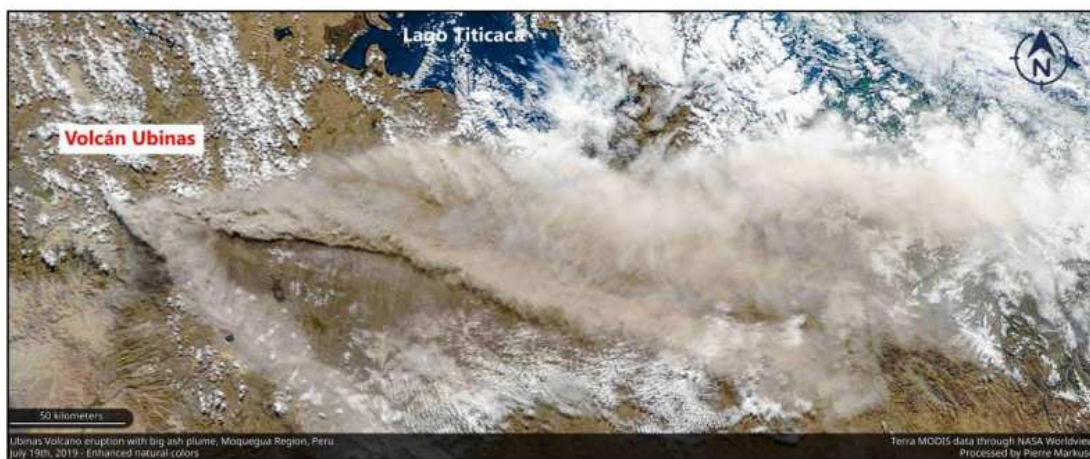


Figura 6: Pluma de cenizas del volcán Ubinas el 19 de julio de 2019 a las 13:00UTC, vista desde el satélite TERRA. **Fuente:** Instituto Geofísico del Perú.

3.1 Cronología del Evento

La erupción del 19 de julio de 2019 comenzó a las 07:30 UTC, momento en el cual el satélite GOES-16 detectó el inicio de la actividad eruptiva con un pulso de ceniza que alcanzó temperaturas mínimas de tope entre -60°C y -50°C en la banda de $10.3\ \mu\text{m}$. Esta observación inicial permitió identificar la emisión de ceniza y el inicio del evento. Las alturas de tope de la columna eruptiva estimadas al correlacionar las temperaturas de brillo con el perfil atmosférico fueron de 10.000 - 12.000 m (SMN, 2022).

A las 08:00 UTC, se registró una nueva emisión de ceniza que persistió durante varias horas. Durante este período, se infirieron variaciones en la altura de la columna eruptiva a partir de cambios en la temperatura mínima del tope. Sin embargo, a partir de las 13:00 UTC, se observó una disminución en la intensidad de la emisión, reflejada en un aumento en las temperaturas de tope, que superaron los -40°C en proximidad al volcán, lo que indicaba alturas por debajo de 12.000 m (SMN, 2022).

A las 16:00 UTC, la entrada de nubosidad meteorológica dificultó la detección continua de la pluma de ceniza mediante imágenes satelitales. No obstante, el VAAC Buenos Aires reportó que el volcán continuaba emitiendo ceniza a niveles más bajos de acuerdo a la cámara web del observatorio vulcanológico.

El impacto en la superficie se registró a partir de las 12:00 UTC del 19 de julio, cuando varias estaciones meteorológicas en Bolivia, incluyendo Cobija, Santa Ana, Cochabamba, Concepción, Oruro y Vallegrande, confirmaron la presencia de ceniza volcánica en sus observaciones SYNOP (Fig. 7). A las 16:00 UTC, la estación meteorológica de La Paz, ubicada a unos 240 km al noreste del volcán, reportó una visibilidad reducida a 4 km debido a la presencia de ceniza. Al día siguiente, el 20 de julio, la pluma de ceniza se desplazó hacia el este en niveles altos y alcanzó el espacio aéreo sobre Brasil, alcanzando Río de Janeiro y São Paulo

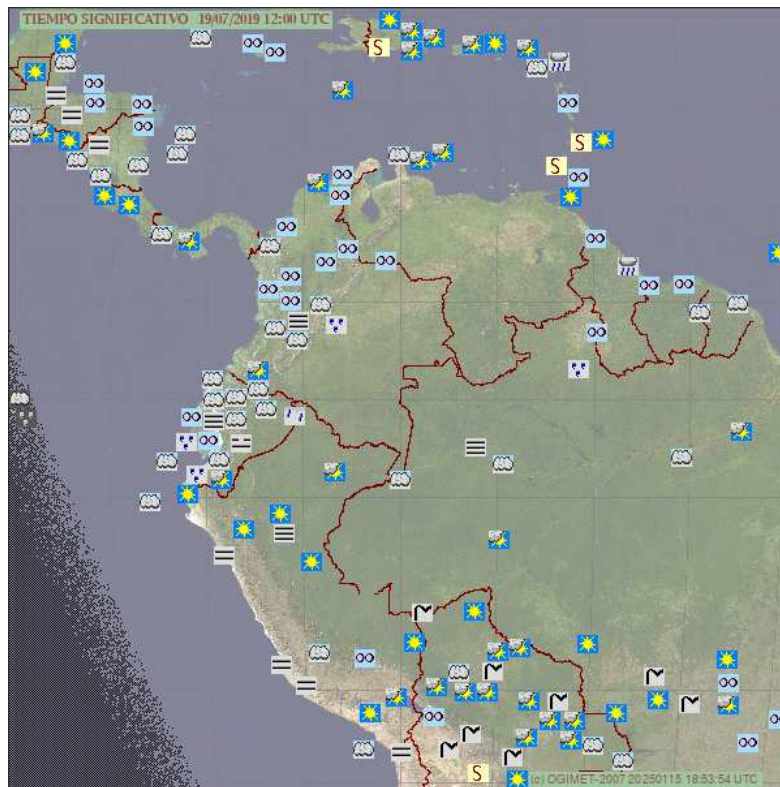
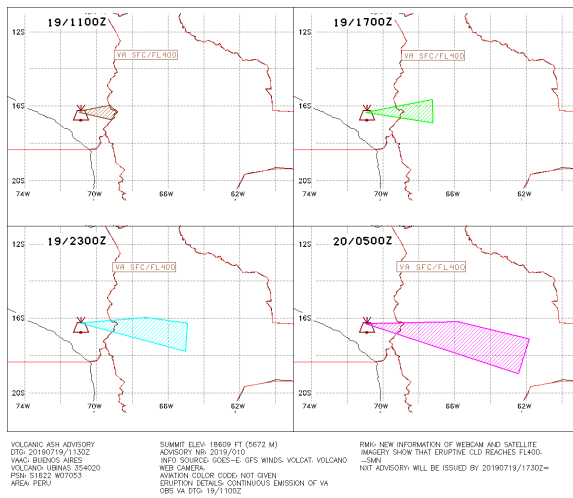


Figura 7: Tiempo significativo registrado por las estaciones meteorológicas de superficie para las 12:00 UTC del 19 de julio 2019. **Fuente:** OGIMET

Se emitieron varios mensajes VAA/VAG desde VAAC Buenos Aires (Fig. 8), que evidencian la presencia de ceniza volcánica en la región. A las 08:10 UTC, se reportó un pulso fuerte observado a las 07:30 UTC, basado en imágenes de GOES 16 y cámara web del IGP. A las 08:45UTC, se informaron emisiones continuas de ceniza alcanzando hasta FL320(9754 m), desplazándose hacia el este a 50 kt, según los datos de GOES 16, GFS, VOLCAT y cámara web. A las 11:30 UTC, se reportaron emisiones de ceniza que llegaron hasta FL400(12200 m), moviéndose hacia el este a 45 kt, con confirmación de la altura de la nube eruptiva a través de GOES 16, GFS, VOLCAT y cámara web. Finalmente, a las 15:30 UTC, se detectaron dos plumas de ceniza: una desprendida del volcán que alcanzaba hasta FL400 (12200 m) y se desplazaba corriente abajo hacia el este a 45 kt, mientras que la otra conectada al volcán llegaba hasta FL200 (6100 m) y se movía hacia el sudeste a 20 kt. Según los datos disponibles, las emisiones fueron disminuyendo y la nubosidad comenzó a aumentar.

(a).



(b).

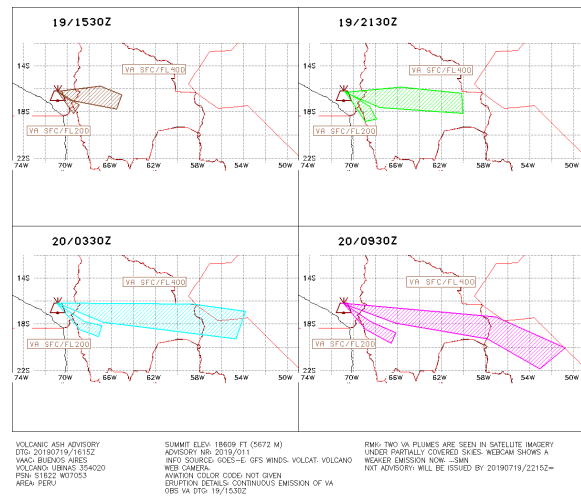


Figura 8: VAGs emitidos por el VAAC Buenos Aires para la erupción del volcán Ubinas el día 19 de julio del 2019. Polígonos de: (a) observación a las 11:00 UTC (marrón), pronóstico a 6 (verde) 12 (celeste) y 18 horas (magenta); (b) observación a las 15:30 UTC(marrón), pronóstico a 6 (verde), 12(celeste) y 18 horas (magenta).

3.2 Situación Sinóptica

A continuación, se describen las condiciones meteorológicas presentes al momento y horas siguientes a la erupción del volcán Ubinas el 19 de julio de 2019. Para este análisis se utilizan los datos de reanálisis ERA-5 (Hersbach, et al. 2020) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) y las imágenes satelitales disponibles.

El 19 de julio de 2019 a las 09:00 UTC, horario más próximo al comienzo de la erupción, de acuerdo a alturas estimadas a partir del uso combinado de las temperaturas de brillo detectadas por el GOES-16, que rondaron los -50°C , y el perfil atmosférico de temperatura modelado, se pudo inferir que la pluma se desplazaba por debajo de los 14.000 m sobre nivel del mar. En 250 hPa (Fig. 9 (d)), es decir aproximadamente a 11.000 m de altitud (FL320), se observó sobre el volcán una circulación predominantemente del viento del oeste. Las velocidades del viento en este nivel alcanzaban valores cercanos a 30kt.

En 250 hPa (Fig. 9 (d)), se observó en cercanías del volcán un eje de vaguada que produjo un patrón de circulación con vientos intensos hacia el este y corriente abajo se observó el aumento de la velocidad del viento con dirección hacia el sudeste. Los vientos en este nivel vertical eran predominantemente del oeste, alcanzando cerca del volcán velocidades de 40 kt que favorecían el desplazamiento de las cenizas hacia el este, tal como pudo observarse en la imagen satelital de las 09:00 UTC (Fig. 10 (a)). De acuerdo al aviso de cenizas volcánicas de las 08:45 UTC la pluma de ceniza se desplazaba a 50 kt hacia el este. Este patrón explicó gran parte de la rápida dispersión de material volcánico hacia el este durante la mañana del 19 de julio. En 500 hPa (Fig. 9 (g)), en cercanías del volcán, el viento presentaba una dirección hacia el sudeste, asociado al anticiclón ubicado sobre Brasil. Una rama de la pluma de ceniza desplazándose desde el volcán hacia el sudeste comenzó a observarse en la imagen Ash RGB desde las 09:00 UTC, con una intensificación progresiva a partir de las 13:00 UTC (Fig. 10 (b)).

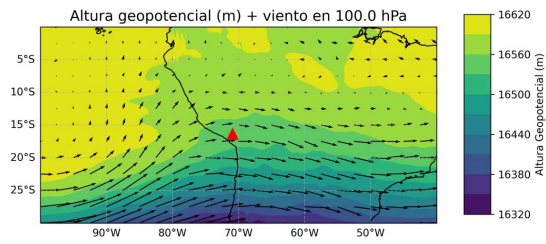
A las 13:00 UTC, la emisión volcánica se redujo y por consecuencia también se redujo su altura. Se identificaron claramente dos direcciones preferenciales de dispersión que se observaban en la imagen satelital (Fig 10 (b)): una hacia el este, asociada a la circulación en niveles superiores (250 hPa, Fig. 9 (e)), y otra hacia el sudeste, vinculada a la circulación en niveles más bajos más intensificados a esta hora (500 hPa, Fig. 9 (h)).

A las 16:00 UTC (Fig 11 (a)), se podían observar las dos plumas de ceniza, cada una asociada a los distintos niveles verticales. En este momento, el mensaje VAA/VAG reportó dos plumas una en FL400 (12200 m) moviéndose hacia el este a 45 kt y otra en FL250 (7620 m) desplazándose hacia el sudeste a 20 kt. A esta hora en 100 hPa, los vientos predominantes se mantenían del oeste (Fig. 9 (c)). En 250 hPa (Fig 9 (f)), los vientos también mantenían una dirección predominante hacia el este, lo que explica la extensión de la pluma en este nivel hacia regiones más alejadas del volcán. Por otro lado, en 500 hPa (Fig. 9 (i)), la influencia del anticiclón ubicado sobre Brasil continuó generando la circulación hacia el sudeste en las cercanías del volcán Ubinas, lo que contribuyó a la dispersión de la pluma en niveles bajos en esta dirección.

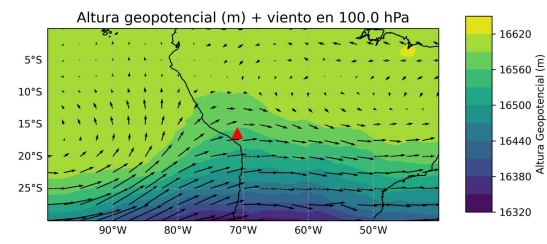
Hacia las 16:00 UTC (Fig. 11 (a)), el incremento de la cobertura nubosa impidió continuar observando el volcán directamente. Sin embargo, la pluma de niveles altos continuó desplazándose hacia el este, extendiéndose sobre Perú y Bolivia, donde se reportó caída de

material fino, pasando luego por el norte de Paraguay y sur de Brasil, dejando de observarse hacia final del 20 de julio al llegar al Océano Atlántico.

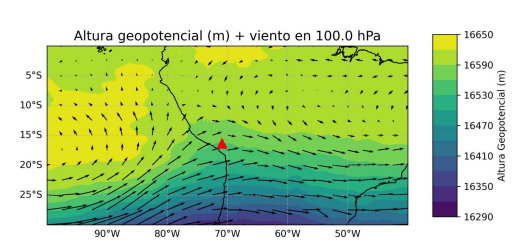
a)



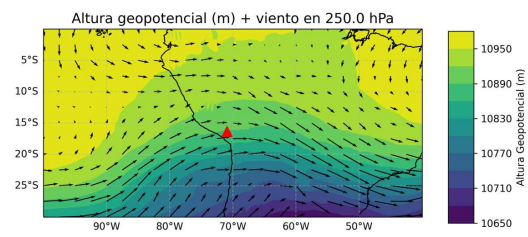
b)



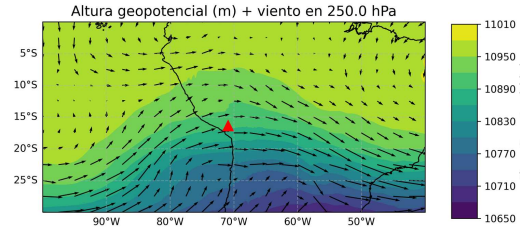
c)



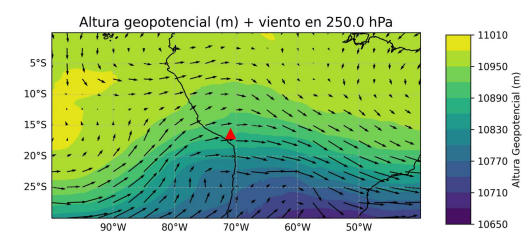
d)



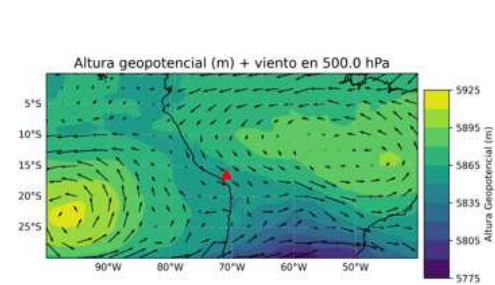
e)



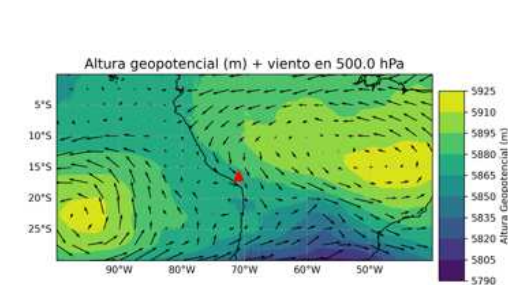
f)



g)



h)



i)

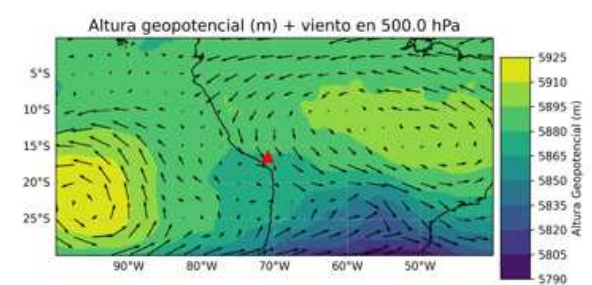


Figura 9: Campos de viento (m s^{-1}) y altura geopotencial (m) del ERA5 en 100, 250 y 500 hPa para el 19 de julio 2019 a las 9:00 UTC (a), (d), (g), 13:00 UTC (b), (e), (h) y 16:00 UTC (c), (f), (i). En rojo se destaca la posición del volcán Ubinas.

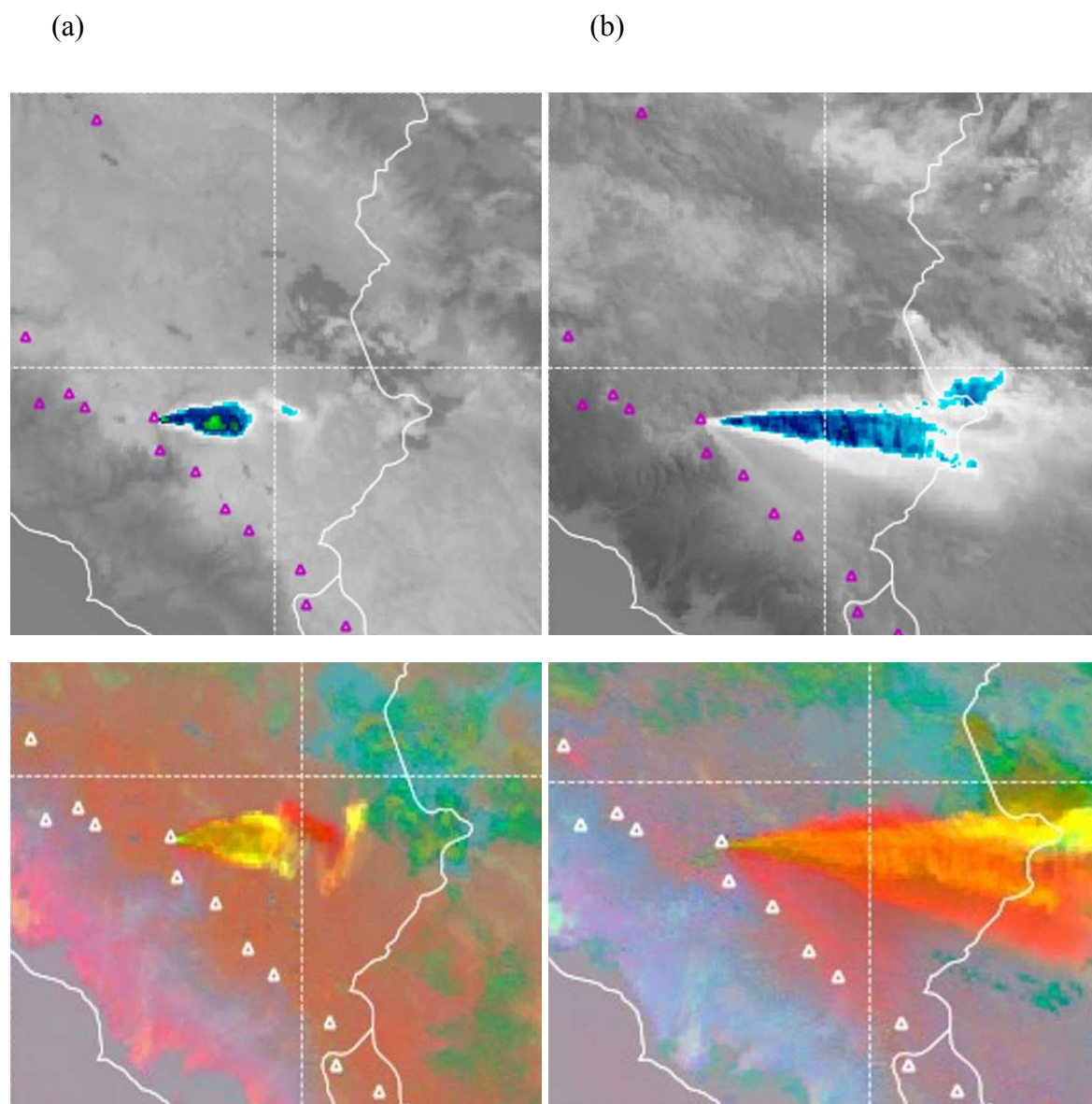


Figura 10: Temperatura de tope en $10.3\ \mu\text{m}$ estimada con datos del satélite GOES-16 (arriba) y Ash RGB (abajo) para el 19 de julio del 2019 a las (a) 9:00 y (b) 13:00 UTC.

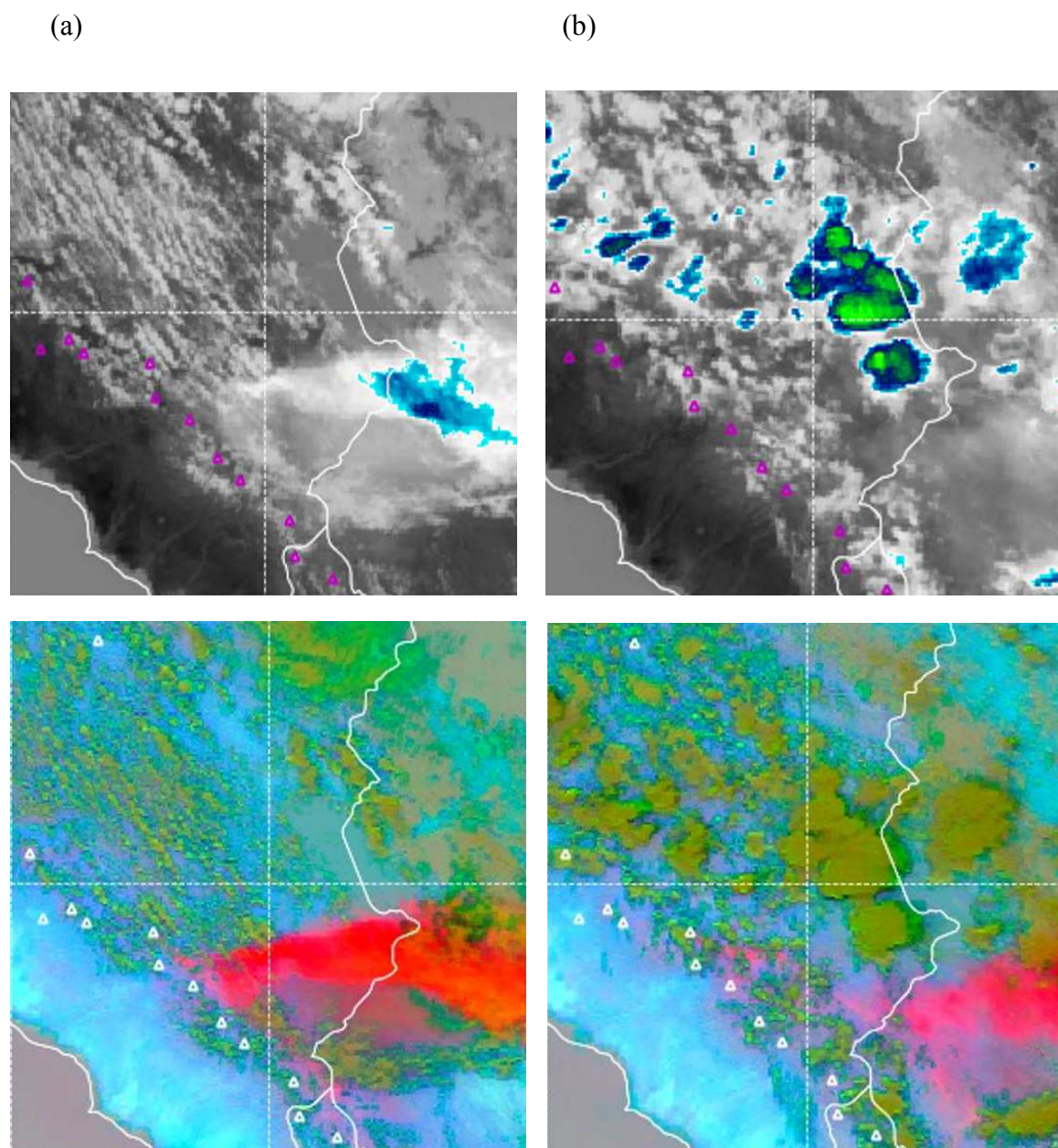


Figura 11: Temperatura de tope en 10.3 μm estimada con datos del satélite GOES-16 (arriba) y Ash RGB (abajo) para el 19 de julio del 2019 a las (a) 16:00 y (b) 19:00 UTC.

3.3 Configuración Experimental

En este estudio, se emplearon campos meteorológicos del modelo Global Forecast System (GFS), desarrollado por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, 2015) de Estados Unidos, que son utilizados operativamente en VAAC Buenos Aires. Este modelo meteorológico acoplado integra cuatro componentes principales: la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, los cuales trabajan conjuntamente para generar representaciones de las condiciones meteorológicas a nivel global. El GFS tiene una resolución horizontal nativa de aproximadamente 13 km ($\sim 0.125^\circ$)², más alta que la utilizada en este estudio lo que permite captar detalles significativos de las condiciones atmosféricas. En este trabajo, se utilizó la resolución disponible por parte del GFS de 0.25° , y una resolución temporal de 6 horas, específicamente del ciclo correspondiente a las 06:00 UTC del día 19 de julio del 2019.

La granulometría de las partículas (TGSD, por sus siglas en inglés) fue estimada con base en estudios de erupciones volcánicas análogas (Mastin et al., 2009) y datos de campo (Costa et al., 2016). Según Costa et al. (2016), tras analizar 20 erupciones explosivas, encontró que las distribuciones de partículas eran predominantemente bimodales (17 casos), mientras que en menor proporción presentaban una distribución unimodal (3 casos). Las diferencias en las distribuciones estaban asociadas a la composición y explosividad de cada volcán. En este caso el volcán Ubinas de composición andesítica tiene mayor similitud con las erupciones de granulometría unimodal estudiadas por Costa et al., (2016). Para este trabajo, se adoptó una TGSD Gaussiana con una media de 0Φ (1 mm) y un desvío estándar de 2.8Φ . Las simulaciones se centraron exclusivamente en el transporte de la fracción más fina de ceniza (partículas menores a 6Φ), ya que son los tamaños de partículas detectadas por los productos satelitales, capaces de identificar principalmente partículas de tamaños menores a $10 \mu\text{m}$ por las longitudes Infrarrojas utilizadas.

En cuanto a flujo de masa, se empleó el esquema propuesto por Woodhouse et al. (2013), que considera la interacción entre la columna eruptiva y los vientos del entorno. Además, la

² https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php

distribución vertical de la masa se parametrizó utilizando el esquema de Suzuki (Pfeiffer et al., 2005), que representa la estructura de tipo "hongo" típica de las columnas eruptivas intensas (Fig. 2). Este esquema (ec. 7) incluye parámetros como la altitud máxima de la columna (H), un factor de normalización (S_0) y dos parámetros adimensionales (A y Lambda) que regulan la forma de la distribución (Osores, 2018), que en este estudio se fijaron en A=5 y L=2 .

$$S(x, y, z, t) = S_0 \left\{ 1 - \frac{z}{H} \exp[A(z/H - 1)] \right\}^\lambda \quad \text{ec. 7}$$

El modelo FALL3D, se configuró con una resolución horizontal de 0.10° , una resolución vertical de 1 km con tope en 20 km y un paso temporal de 1 hora. Las simulaciones se iniciaron a las 08:00 UTC del día 19 de julio del 2019 y continuaron hasta las 19:00 UTC, siendo este último el horario de pronóstico final para ese mismo día. En todo momento, se mantuvo la altura de la columna eruptiva constante, sin variaciones durante todo el pronóstico, emulando el primer pronóstico generado por el VAAC Buenos Aires.

Se consideraron 3 ensambles de 20 miembros, para generar cada ensamble se perturbaron los parámetros más sensibles de acuerdo al estudio de Osores, (2018) acotando el tope con la altura estimada a partir de las temperaturas de brillo, que progresivamente se fueron ajustando en base al estudio de los indicadores detallados en la sección 2.5. La Tabla 3 resume las configuraciones de las tres simulaciones realizadas, cada una diseñada para evaluar diferentes escenarios de dispersión de ceniza volcánica.

Simulación	Altura de la columna		Suzuki A		Mass flow rate	
	Valor central (m)	Perturbación	Valor central	Perturbación	Valor central	Perturbación
A	8000	30%	5	2	Woodhouse et al. (2013)	50%
B	14000	30%	5	2	Woodhouse et al. (2013)	-
C	11000	30%	5	2	Woodhouse et al. (2013)	-

Tabla 3. Configuración de los ensambles generados y sus respectivas perturbaciones.

La Simulación A utilizó una columna de ceniza de 8.000 m sobre el nivel del mar, con el objetivo de analizar escenarios en los que la erupción no alcanzó grandes altitudes. Este diseño buscó explorar cómo las condiciones en niveles bajos de la atmósfera explicaron la dispersión hacia el sudeste de la pluma (ver sección 3.2). Para generar los miembros del ensamble, se aplicó una perturbación del 30% en la altura control de la columna eruptiva, considerando una PDF Uniforme, se perturbó el parámetro A de Suzuki en un valor 2 absoluto y se perturbó el flujo de masa en un 50% para generar una mayor dispersión entre los miembros ya que la perturbación sola de la altura de columna tan baja generaba poca dispersión en los miembros del ensamble.

En la Simulación B, en cambio, se incrementó la altura de la columna eruptiva a 14.000 m, representando condiciones de niveles altos, de acuerdo a las temperaturas de brillo observadas (ver sección 3.2). Al igual que en la Simulación A, se aplicó una perturbación del 30% en la altura, el parámetro A de Suzuki en un valor 2 absoluto. Aquí, no se introdujeron variaciones en el flujo de masa, ya que como mínimo en condiciones de calma el flujo de

masa se relaciona en una potencia a la cuarta de la altura de columna, generando grandes variaciones.

Finalmente, la Simulación C se diseñó con una altura de columna control intermedia de 11.000 m, a partir del análisis de desempeño de las métricas evaluadas. Se emplearon las mismas perturbaciones que en la Simulación B.

4. Resultados

Este análisis se centra en el último tiempo simulado, ya que representa el momento en que las dos plumas coexisten, una desprendida del cráter, la otra conectada pero con visión parcial por presencia de nubosidad, lo que hace una escena compleja y crítica para evaluar y hallar la configuración óptima.

En la Figura 12 se muestra la distribución de la carga de masa de ceniza volcánica estimada a partir de datos del satélite GOES-16 para las 19:00 UTC, correspondiente al plazo de 11 horas de pronóstico. Esta observación se utiliza como referencia principal para la validación de las simulaciones del modelo.

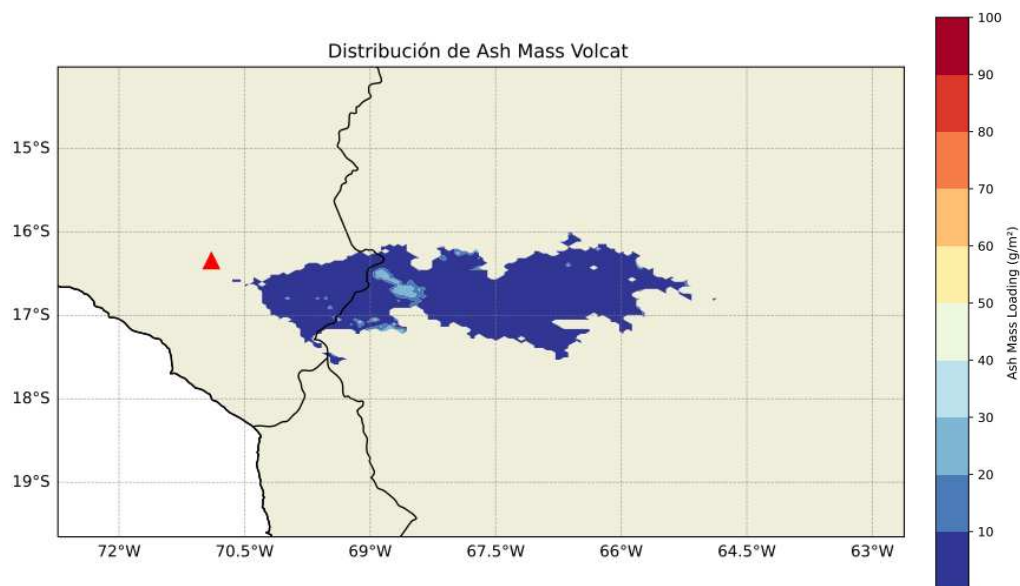


Figura 12: Carga de masa de ceniza volcánica VOLCAT estimada utilizando datos del GOES-16 a las 19:00 UTC.

Para el 19 de julio de 2019 a las 19:00 UTC los miembros de los ensamble de las simulaciones A, B y C se muestran en las Fig. 13, 14 y 15 respectivamente. Las plumas generadas por la simulación A son poco extensas y con poca cantidad de masa, esperable para plumas de baja altura de columna. Mientras que las simulaciones B y C presentan plumas

más extensas con mayor cantidad de masa en suspensión. A simple vista es difícil determinar entre las simulaciones cuál es la que mejor se ajusta a la observación, por lo que para ello se calculan métricas para poder definirlo de manera objetiva.

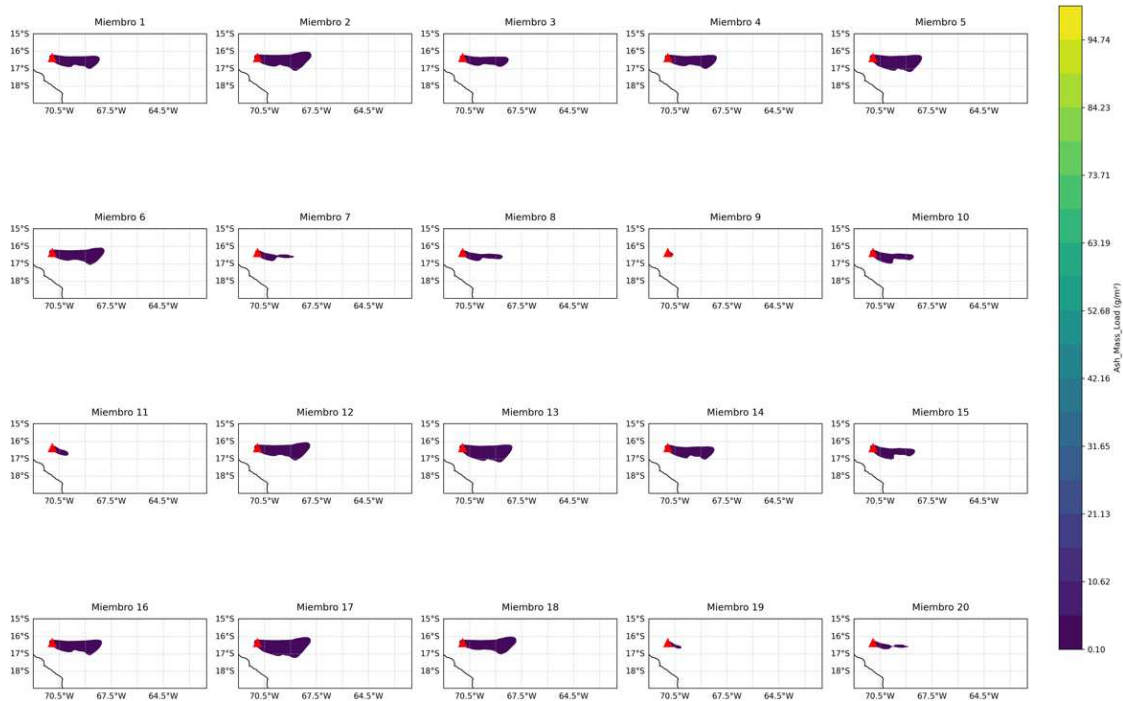


Figura 13: Carga de masa de los miembros del ensemble Simulación A válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

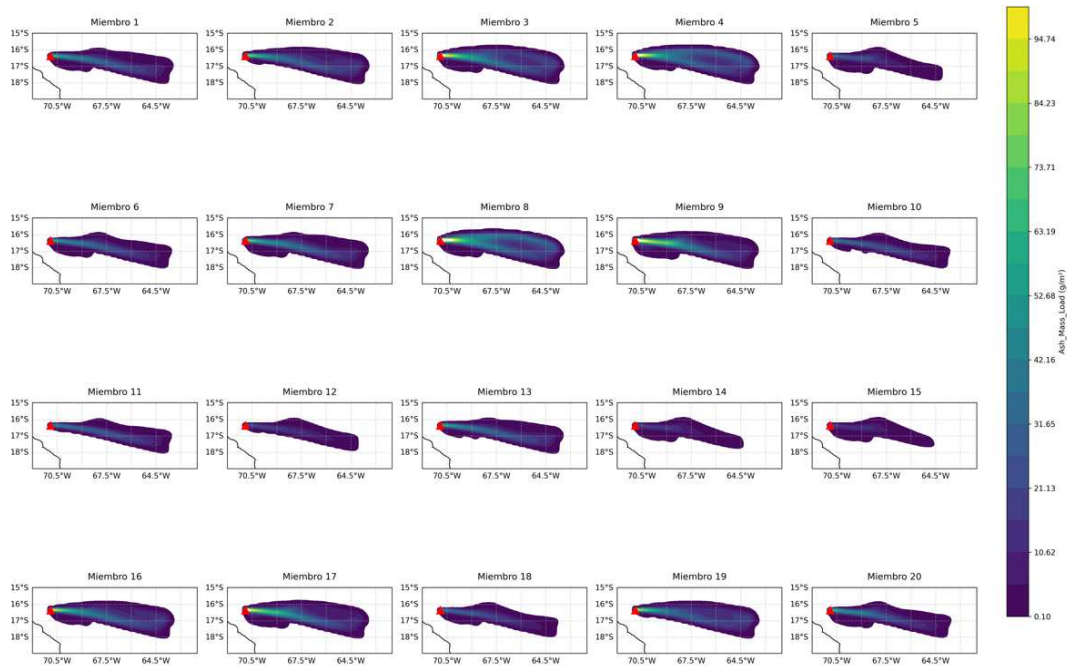


Figura 14: Carga de masa de los miembros del ensamble Simulación B válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

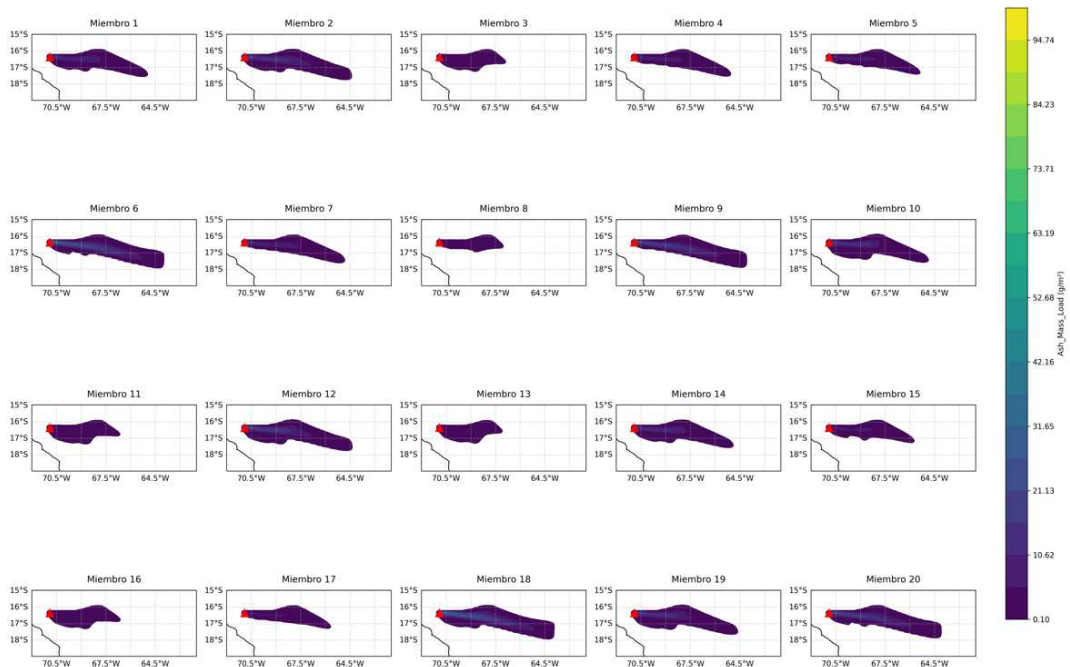


Figura 15: Carga de masa de los miembros del ensamble Simulación C válido para el 19 de julio a las 19:00 UTC.

Para el cálculo de las métricas se tomaron los datos de carga de masa modelada y observada filtrados por los píxeles con nubosidad meteorológica y llevados a la misma retícula tal como se explica en la sección 3.3. Para analizar la concordancia entre estructura espacial de la pluma modelada y observada se consideraron los puntos que superan el umbral de detección de 0.1 g m^{-2} en cada conjunto de datos y se calcularon los indicadores categóricos explicados en la sección 2.5.

En la Figura 16 se presenta la variación de la métrica Figure of Merit of Space (FMS), ordenado para los diferentes miembros generados en cada simulación, siendo el valor óptimo del FMS de 1. Esta métrica es clave para evaluar la correspondencia espacial entre las simulaciones del modelo y las observaciones satelitales. En la simulación A (altura control de 8000 m), se observa un rango amplio de valores de FMS, con los mejores miembros, como el 17 (cuya altura es 8.643 m), alcanzando valores de FMS cercanos a 0.20 y mostrando una mayor correspondencia con las observaciones satelitales, mientras que los peores miembros, como el 20 (7.552 m) con valores de FMS cercanos a 0, indicando el no acierto de lo modelado respecto de lo observado.

En contraste, la simulación B (altura control de 14000 m), que utiliza una mayor altura de la columna eruptiva, presenta mejoras significativas en los valores de FMS, con un máximo mayor a 0.60 alcanzado por el miembro 15 (cuya altura es 11.513 m) y un mínimo de 0.35 para el miembro 19 (14.829 m), con una reducción en el FMS gradual entre miembros. Este resultado sugiere que una configuración con tendencia a una mayor altitud mejora la correspondencia espacial entre las simulaciones y las observaciones. De todas maneras, es importante tener en cuenta que altitudes excesivas en este caso, podrían afectar los valores de esta métrica (Fig. 17)

Por otro lado, en la simulación C (altura control de 11.000 m) el mejor miembro es el 10 (cuya altura es 11.315 m) alcanza un FMS superior a 0.60, lo que refleja un buen ajuste espacial al igual que la simulación B. Aunque el peor miembro 8 (9.503 m) exhibe un desempeño menos favorable con un FMS de 0.25. La variación del FMS entre los miembros en la simulación C es más pronunciada en comparación con la simulación B, que muestra una distribución más suave. Sin embargo, a pesar de esta mayor variabilidad, la simulación C alcanza valores más altos de FMS en varios miembros, mostrando mayor acierto entre los miembros de la simulación C respecto de la B. Los resultados en general destacan la

capacidad del modelo para acercarse más a las observaciones bajo ciertas configuraciones específicas.

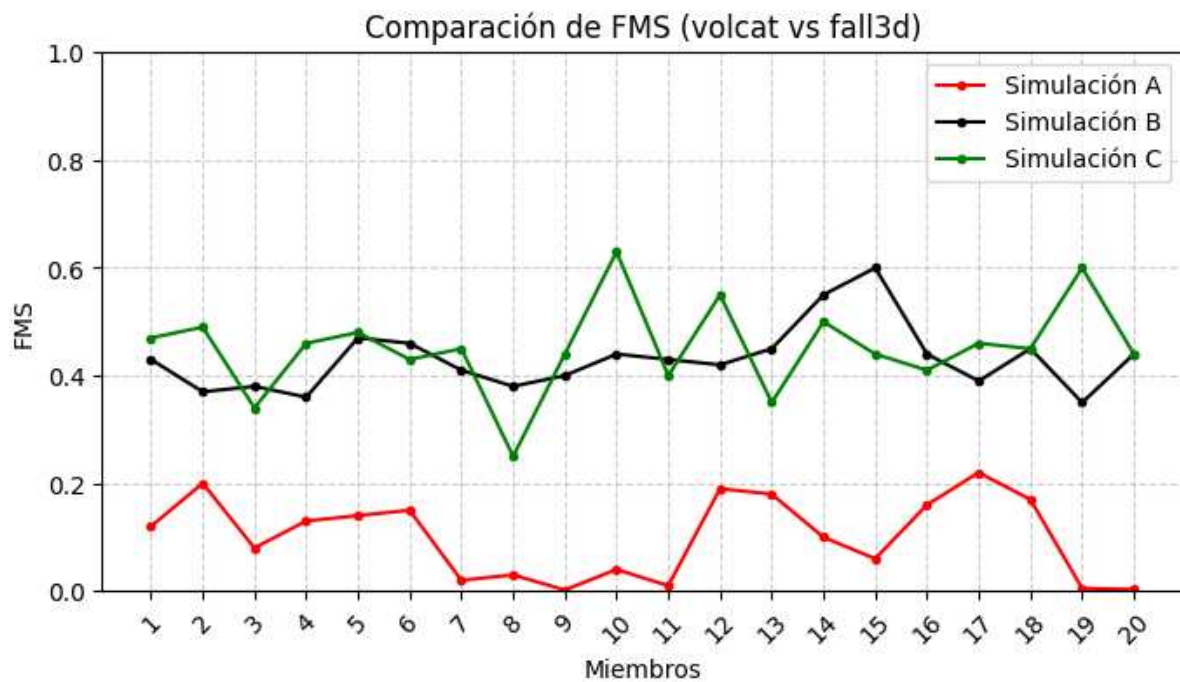


Figura 16: FMS ordenado por miembro para las tres simulaciones A, B y C.

Se analizaron además la variaciones del FMS en función de cada parámetro perturbado de cada simulación, la mayor correlación se observó con el cambio de alturas (Fig. 17). Mientras que se observó una baja correlación entre el parámetro A de Suzuki y los cambios en el FMS en ninguna de las simulaciones (no se muestra).

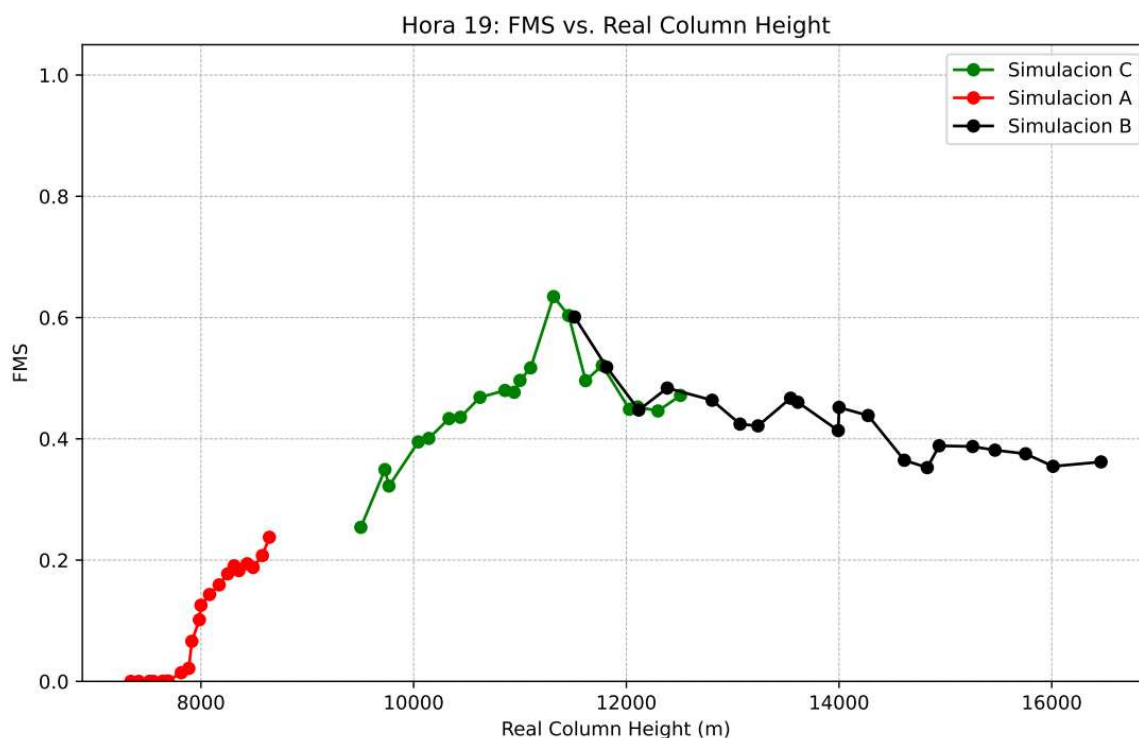


Figura 17: FMS en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

En la simulación A, los valores del FMS oscilaron entre 0 y 0.20, mostrando una tendencia positiva frente al aumento de la altura de la columna eruptiva (Figura 17, en rojo). Para alturas bajas, cercanas a los 7400 m, el FMS se mantuvo en valores mínimos, indicando una muy baja correspondencia espacial entre las simulaciones y las observaciones satelitales. Sin embargo, al aumentar la altura de la columna a aproximadamente 8.600 m, se alcanzaron los valores máximos de FMS (~ 0.20) para la simulación A, lo que evidencia una mejora en la representación de la dispersión de ceniza.

La Simulación B (Fig. 17, en negro) presentó un comportamiento notablemente diferente al de la Simulación A. En este caso, el FMS mostró una tendencia negativa frente al aumento de la altura de la columna eruptiva. Los valores de FMS oscilaron entre 0.35 y 0.60, siendo máximos (~ 0.60) para alturas más bajas (~ 12.000 m) y mínimos (~ 0.35) para alturas superiores a 16.000 m. Este resultado indica que, a medida que la altura de la columna aumenta, la correspondencia espacial entre las simulaciones y las observaciones se deteriora.

La Simulación C fue diseñada utilizando una altura de columna intermedia (~ 11.000 m) basada en los resultados del FMS de las simulaciones previas, con el objetivo de buscar un

valor óptimo que permita identificar la altura de columna que mejor representaba la pluma observada. Los resultados obtenidos para el FMS indicaron que esta altura logró maximizar la correspondencia espacial entre las simulaciones y las observaciones (Fig. 17, en verde). A un valor de altura de columna ligeramente por encima de los 11.000 m (~ 11315 m), el FMS alcanzó un valor máximo (>0.60), superando los resultados obtenidos para alturas más bajas (~ 9.500 m) y más altas (~ 12.500 m), que mostraron valores menores. Este comportamiento indica que la altura de 11.315 m tiene una mejor representación de la pluma observada.

Por otro lado, se analizó la tasa de falsas alarmas FAR (Fig.18) entre las tres configuraciones evaluadas y esta comparación revela patrones claramente diferenciados. En la simulación A, el FAR muestra un comportamiento altamente variable. Al inicio, toma un valor moderado, aumenta a 1 y se reduce nuevamente a medida que aumenta la altura de la columna. Para alturas más bajas, el FAR tiende a ser más alto, lo que sugiere una mayor proporción de falsos positivos en estas condiciones. A medida que la altura de la columna ronda los 8.000 metros, el FAR disminuye y se estabiliza en un rango mínimo relativo entre 0.2 y 0.4. Este comportamiento podría explicar la mayor correspondencia entre la pluma de niveles bajos observada y la dispersión modelada, aún así presentando algunas falsas alarmas.

La simulación B, que se concentra en alturas comprendidas entre 12.000 y 16.000 m, presenta una tendencia distinta. Aquí, el rango de valores de FAR es más restringido, oscilando entre 0.4 y 0.65, lo que refleja una menor sensibilidad del ensamble a las perturbaciones de los parámetros en comparación con la simulación A. Sin embargo, el aumento progresivo de FAR a medida que aumenta la altura sugiere una tendencia a sobreestimar la ocurrencia de eventos, particularmente en las alturas superiores del rango analizado. Si bien esta configuración muestra un comportamiento más estable, su desempeño en términos de falsos positivos aún es moderado y requiere mejoras para alturas mayores.

Por otro lado, la simulación C, que abarca alturas entre 9000 y 12000 metros, exhibe un patrón más favorable y controlado en comparación con las otras configuraciones. Inicialmente, el FAR comienza con valores alrededor de 0.4 y decrece de manera progresiva hasta alcanzar un mínimo cercano a 0.3 entre los 10.000 y los 11.000 m, lo que señala una disminución significativa en los falsos positivos en este intervalo. Sin embargo, para alturas superiores a los 12.000 m, el FAR vuelve a incrementar, superando nuevamente los valores de 0.4, reflejando un aumento en las falsas alarmas a mayores alturas. Este comportamiento

resalta que, entre los 10.000 y 11.000 m se posiciona la altura óptima, minimizando el FAR y consolidándose como el punto de mejor desempeño dentro de esta simulación.

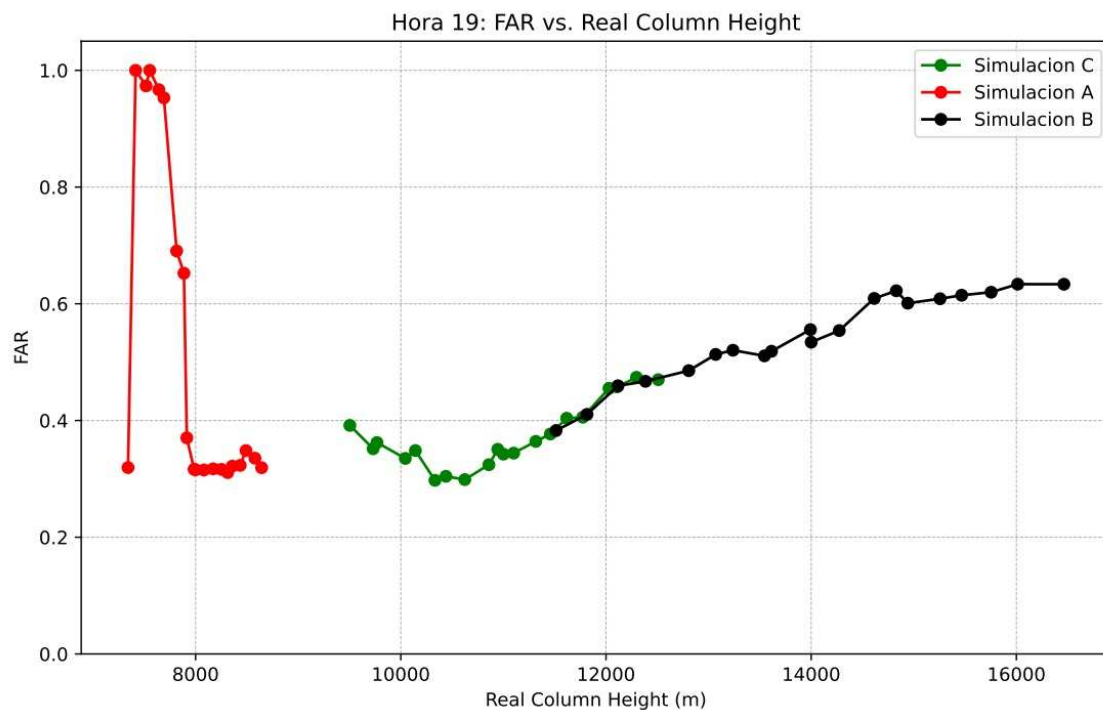


Figura 18: FAR en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

Al analizar el POD (Fig. 19), la simulación A presenta valores de 0 para la menor altura, indicando la falta de aciertos. A medida que la altura se acerca a los 8.000 m se observa un incremento continuo del POD que llega hasta casi 1 para las mayores alturas de la simulación B, esperable ya que a mayor altura mayor es la cantidad de masa y por ende las plumas modeladas son más grandes cubriendo el área observada. Dado que el POD no penaliza las falsas alarmas, este índice no muestra una señal clara que permita identificar la mejor simulación.

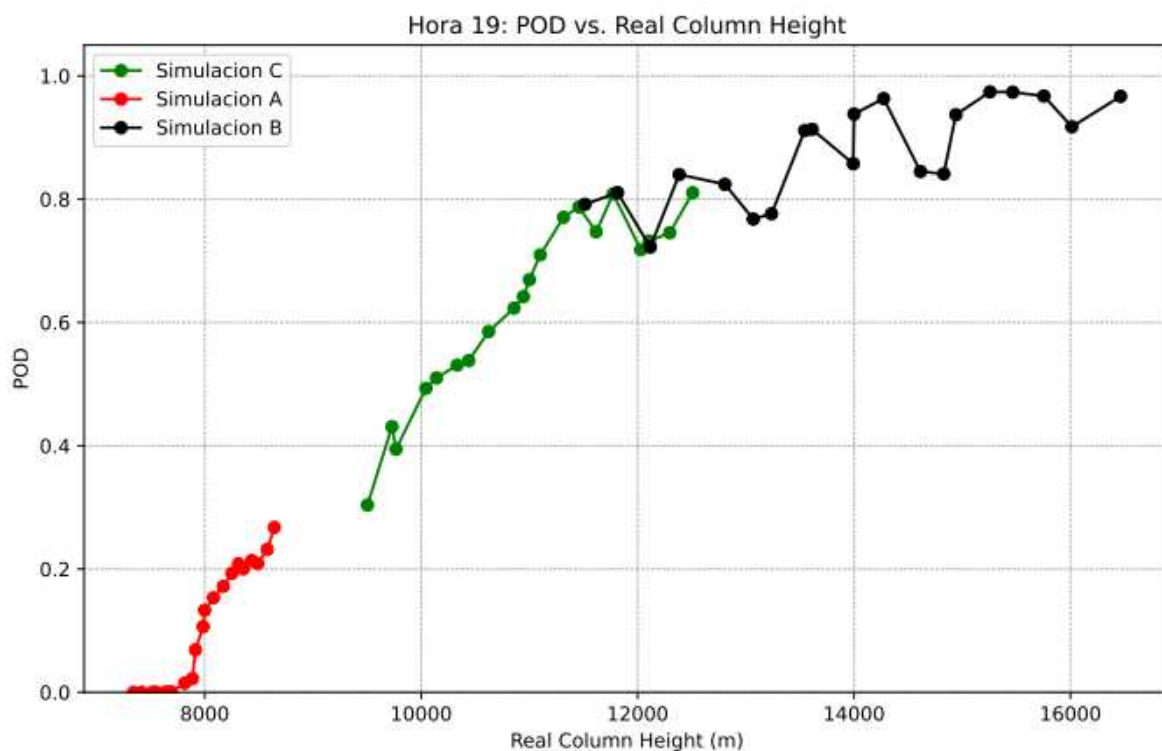
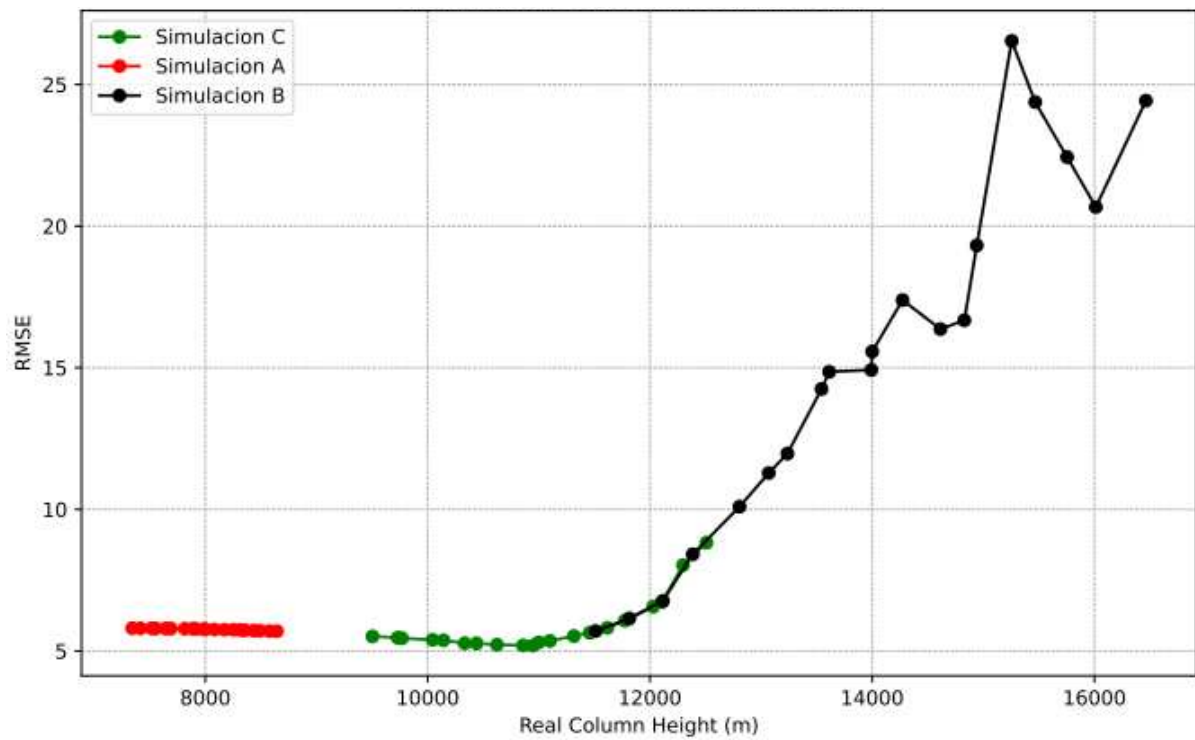


Figura 19: POD en función de las alturas de columna eruptiva para las tres simulaciones el 19 de julio a las 19:00 UTC.

Para evaluar el desempeño en términos de las predicciones puntuales de carga de masa de ceniza se analiza el error cuadrático medio (RMSE). La Figura 20 muestra cómo el RMSE varía en función de la altura de columna. Este enfoque complementa el análisis previo al proporcionar una medida cuantitativa de los errores absolutos del modelo respecto de las estimaciones satelitales.

(a)



(b)

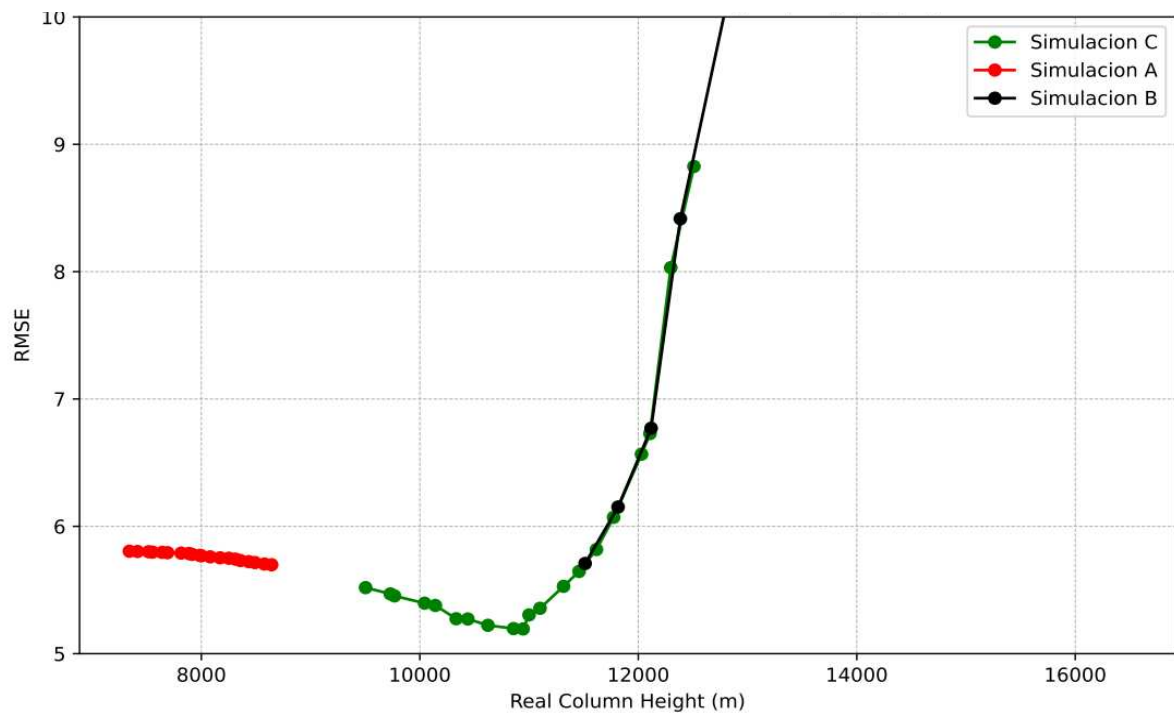


Figura 20: (a) RMSE en función de la altura de columna eruptiva para las tres simulaciones y (b) RMSE con foco para apreciar el mínimo, valido para el 19 de julio a las 19:00 UTC. RMSE[g m²]

En la Simulación A se observa una tendencia decreciente del RMSE ante el aumento de la altura de la columna (Figura 20, b). A alturas bajas (~7.400 m), el RMSE se aproxima a 5.80, mientras que para alturas mayores (~8.600 m) disminuye a 5.70. Aunque la reducción del error es leve, el patrón general sugiere que mayores alturas (en este rango) contribuyen a una mejor representación.

La Simulación C muestra un desempeño destacado, registrando el mínimo absoluto del RMSE (~5.5) entre los 10.000 y 11.000 m de altura (Fig. 20 (b)). A alturas inferiores (~9,500 m), el RMSE permaneció estable con valores ligeramente mayores, pero comenzó a incrementarse rápidamente a partir de los 12.500 m, alcanzando valores cercanos a 9. Este resultado refuerza la idea de que una altura de columna intermedia proporciona un balance adecuado entre la representación espacial y la minimización de errores en las simulaciones.

Los otros parámetros evaluados, Suzuki A y el MFR, no presentaron tendencias claras (no se muestra) en el RMSE [g m^{-2}], presentando una alta variabilidad y un impacto menos evidente en las simulaciones que la altura de columna.

4.1 Discusiones

El presente trabajo de investigación permitió evaluar el desempeño de tres configuraciones simuladas a una hora determinada para modelar la dispersión de ceniza volcánica del volcán Ubinas en función de parámetros del término fuente, destacando la altura de la columna eruptiva. Se armonizaron las bases de datos modeladas y las observadas (eliminación de puntos con nubosidad meteorológica y extrapolación a la misma retícula) para poder realizar comparaciones punto a punto. Para ello, se utilizaron diversas métricas de desempeño espacial como el índice de tasa de falsas alarmas (FAR), el índice de similitud espacial (FMS) y el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias significativas entre las simulaciones evaluadas, permitiendo identificar fortalezas y limitaciones en cada configuración, así como su aplicabilidad en diferentes escenarios eruptivos.

La simulación A (8.000 m) se caracterizó por una alta variabilidad del FAR en las alturas bajas, con un incremento abrupto en la proporción de falsos positivos que alcanzó valores de FAR cercanos a 1. Si bien mostró una mejora relativa en alturas superiores a los 8.000 m, estabilizándose entre 0.3 y 0.4, su desempeño general fue limitado. Sin embargo, a las 13:00

UTC, el coeficiente de correlación alcanzó un valor de 0.60, evidenciando una mayor relación lineal directa entre lo modelado y lo observado. Este resultado se asoció a una disminución en la altura de la columna eruptiva, lo que restringió la dispersión de la pluma a niveles bajos de la atmósfera.

La simulación B (14.000 m) presentó una mayor consistencia en comparación con la Simulación A, con valores de FAR más acotados entre 0.4 y 0.65. Además, los valores del FMS oscilaron entre 0.35 y 0.50, indicando un mayor acierto en la predicción a medida que aumentaba la altura. No obstante, esta configuración mostró una tendencia a incrementar los falsos positivos en alturas mayores, reflejando una sobreestimación en las predicciones.

La simulación C (11.000 m) se posicionó como la mejor configuración. Los valores de FAR comenzaron alrededor de 0.4 y mostraron una disminución progresiva hasta alcanzar un mínimo de aproximadamente 0.3 en alturas entre los 10.000 y 11.000 m, consolidándose como la opción más favorable para representar la pluma. Además, el RMSE presentó el valor mínimo en este rango, lo que reforzó la fiabilidad de esta configuración. A pesar de que el FAR se incrementó nuevamente para alturas superiores a los 12.000 metros, el desempeño global de esta simulación demostró ser superior en comparación con las demás configuraciones evaluadas.

Esta evaluación se refuerza al considerar la métrica FMS, cuya importancia radica en su capacidad para penalizar tanto las sobreestimaciones como las subestimaciones en la distribución de ceniza. A diferencia de otras métricas tradicionales, el FMS proporciona una visión más amplia del desempeño del modelo, permitiendo analizar cómo las variaciones en los parámetros iniciales afectan su capacidad para reproducir los patrones espaciales observados.

En conjunto, los resultados obtenidos destacan la importancia de la altura de la columna eruptiva como el factor más determinante en el desempeño del modelo en el caso evaluado. Mientras que la Simulación A (8.000 m) mostró una mejora gradual en las métricas evaluadas con el aumento de la altura, la Simulación B (14.000 m) presentó una tendencia opuesta, con un deterioro progresivo en el FMS y un incremento significativo del RMSE a alturas mayores. Por su parte, la Simulación C (11.000 m) demostró ser la mejor configuración, logrando optimizar ambas métricas con una altura de columna entre los 10.000 y 11.000 m. Mientras que las alturas demasiado bajas (Simulación A) y demasiado altas (Simulación B)

comprometían el desempeño de la métrica FMS, la configuración intermedia (Simulación C) permitió optimizar la correspondencia espacial con las observaciones.

Los resultados obtenidos destacan la importancia de seleccionar adecuadamente la altura de la columna eruptiva como un parámetro crítico para modelar la dispersión de ceniza volcánica. La configuración intermedia representada por la Simulación C no solo logró minimizar la proporción de falsas alarmas, sino que también redujo el error numérico. Este hallazgo resalta la necesidad de implementar enfoques sistemáticos y objetivos para ajustar los modelos de dispersión volcánica, integrando datos observacionales en tiempo real. Su implementación operativa en el VAAC Buenos Aires contribuiría a la mejora en la representación del término fuente para la generación de la Información Cuantitativa de ceniza volcánica (QVA).

Si bien esta metodología permitirá mejorar la estimación del término fuente, otros errores en el modelado pueden generar grandes diferencias entre la pluma modelada y la observada. Por ello, es necesario continuar este trabajo abordando técnicas de fusión de datos, como la asimilación de datos, que permitan mejorar el estado de la pluma lejos de la fuente.

Para evaluar el desempeño del modelo en este estudio, se utilizaron diferentes métricas, cada una con sus ventajas y limitaciones. Se priorizó el uso del Figure of Merit of Space (FMS) debido a su capacidad para penalizar tanto sobreestimaciones como subestimaciones, proporcionando una evaluación más equilibrada. En contraste, métricas como la Probabilidad de Detección (POD) no resultan adecuadas en este contexto, ya que no penalizan los falsos positivos y pueden llevar a interpretaciones erróneas. Esto se evidencia en que el POD tiende a 1 cuando el modelo sobreestima ampliamente la pluma observada, sin reflejar realmente la calidad de la simulación.

Los resultados obtenidos muestran que la altura óptima de la columna eruptiva varía según la métrica utilizada. Con el FMS, se identificó que alturas de aproximadamente 11.000 m maximizan la correspondencia espacial entre simulación y observación en la Simulación C. En cambio, la tasa de falsas alarmas (FAR) mostró una tendencia decreciente entre 10.000 y 11.000 m, sugiriendo que en este rango se minimizan los falsos positivos. Por otro lado, el análisis del error cuadrático medio (RMSE) indicó que la Simulación C, con una altura de columna de ~11.000 m, presentó el menor error absoluto, reforzando la idea de que una altura intermedia permite lograr un balance adecuado entre representación espacial y minimización

de errores. Estos resultados demuestran que la elección de la métrica de validación es crucial y que una combinación de múltiples métricas permite una evaluación más robusta del desempeño del modelo.

5. Conclusiones

Los resultados de este trabajo son alentadores y podrían utilizarse como guía para el análisis de los resultados de la información QVA en tiempo real en VAAC Buenos Aires. Para avanzar hacia la implementación de un producto operativo funcional, resulta esencial establecer un enfoque sistemático para identificar la configuración óptima del término fuente en el modelo de dispersión para distintos tipos de erupciones volcánicas. Esto implica definir métricas robustas como el índice FMS y el FAR, que permitan evaluar de manera integral la estructura espacial de la pluma e índices como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación que permitan evaluar la magnitud de la carga de masa modelada respecto de la estimada por VOLCAT.

El uso de estas métricas no solo permitió evaluar el desempeño general del modelo, sino también identificar posibles mejoras en especial en la altura de columna. Esto resultó esencial para realizar ajustes que optimicen las predicciones.

El ajuste y la validación del término fuente son aspectos fundamentales para garantizar el buen resultado de los modelos de dispersión volcánica. Pero es posible que la complejidad de ciertos procesos no permitan optimizar otros parámetros que no tengan una relación tan marcada como la tiene la altura de columna con la masa inyectada en la atmósfera. Más estudios serían necesarios para poder evaluar esto. Asimismo, es necesario conocer los errores de la carga de masa estimada mediante los datos satelitales para poder conocer el grado de precisión de dicho dato.

La optimización de la altura de columna aquí presentada, complementado con herramientas visuales que faciliten el análisis de los resultados, contribuirá a mejorar el desempeño del modelo en contextos operativos para la gestión de riesgos y la toma de decisiones en el ámbito aéreo. Comparar continuamente el desempeño del modelo con observaciones permitirá realizar ajustes en la altura, incrementando gradualmente la precisión del resultado. Este caso particular presentó pocas variaciones en la altura de emisión, es necesario evaluar esta metodología para eventos con mayor complejidad y a medida que la pluma se aleja más de la fuente será necesario la implementación de técnicas más avanzadas de fusión de datos,

tales como asimilación de datos o inserción de datos, combinando diferentes fuentes de observación.

La representación de los procesos de menor escala en el campo meteorológico con modelos regionales también podría aportar a la mejora en la representación del flujo en regiones de terreno complejo como lo es la Cordillera de los Andes.

En definitiva, este estudio muestra la capacidad de optimizar el ensamble de dispersión de ceniza a partir de la combinación de los datos modelados y los observados utilizando métricas de verificación objetivas. La integración de esta técnica y una evaluación sistemática de las simulaciones permitirán optimizar los pronósticos operativos contribuyendo a la seguridad aeronáutica.

Bibliografía

ALEXANDER, David. Volcanic ash in the atmosphere and risks for civil aviation: a study in European crisis management. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2013, vol. 4, p. 9-19.

ARASTOPOUR H., Wang C. H. y Weil S. A., 1982: Particle-particle interaction force in a dilute gas-solid system, *Chem. Eng. Sci.*, 37, 1379–1386.

BECKETT, Frances M., et al. Atmospheric dispersion modelling at the London VAAC: A review of developments since the 2010 Eyjafjallajökull volcano ash cloud. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no 4, p. 352.

COSTA, Antonio; PIOLI, Laura; BONADONNA, Costanza. Assessing tephra total grain-size distribution: Insights from field data analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, vol. 443, p. 90-107.

CLARKSON, Rory J.; MAJEWICZ, Elizabeth JE; MACK, Peter. A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, vol. 230, no 12, p. 2274-2291.

DEGRUYTER, Wim; BONADONNA, Costanza. Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no 16.

DELLINO P., Mele D., Bonasia R., Braia L. y La Volpe R., 2005: The analysis of the influence of pumice shape on its terminal velocity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2005GL023954

ENGWELL, Samantha, et al. Characterising, quantifying, and accessing eruption source parameters of explosive volcanic eruptions for operational simulation of tephra dispersion: a current view and future perspectives. *Bulletin of Volcanology*, 2024, vol. 86, no 7, p. 67.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2020). *The ECMWF Model Documentation*. ECMWF.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Jackson, L., Jones, P., ... & Vidard, A. (2020). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>

Instituto Geofísico del Perú (IGP). (2019). Informe técnico: Erupción del volcán Ubinas en julio de 2019.

FOLCH, Arnau; MINGARI, Leonardo; PRATA, Andrew T. Ensemble-based forecast of volcanic clouds using FALL3D-8.1. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 9, p. 741841.

FOLCH, Arnau; MINGARI, Leonardo; PRATA, Andrew T. Ensemble-based forecast of volcanic clouds using FALL3D-8.1. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 9, p. 741841.

FOLCH, Arnau; COSTA, Antonio; MACEDONIO, Giovannin. FPLUME-1.0: An integral volcanic plume model accounting for ash aggregation. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no 1, p. 431-450.

GANSER G. H., 1993: A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles, *Powder Technol.*, 77, 143–152, doi:10.1016/0032-5910(93)80051-B.

GUFFANTI, Marianne, et al. Volcanic hazards to airports. *Natural hazards*, 2009, vol. 51, p. 287-302.

LORENZ, Edward N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, 1963, vol. 20, no 2, p. 130-141.

MACEDO SÁNCHEZ, Orlando, et al. Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe técnico. 2016.

MASTIN, Larry G., et al. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, vol. 186, no 1-2, p. 10-21.

MINGARI, Leonardo, et al. Data assimilation of volcanic aerosol observations using FALL3D+ PDAF. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, no 3, p. 1773-1792.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP). (2015). Global Forecast System (GFS) Model Documentation. National Weather Service, NOAA.

NOAA/NESDIS. (2020). *GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Enterprise Cloud Mask (Version 1.2)*. NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research (STAR).

OACI, 2023. Roadmap for International Airways Volcano Watch (IAVW) in Support of International Air Navigation.

OACI, 2024. Roadmap for International Airways Volcano Watch (IAVW) in Support of International Air Navigation.

OSORES, María Soledad. (2018). Evaluación de estrategias para el pronóstico numérico por ensambles de dispersión de ceniza volcánica en Sudamérica. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

PAVOLONIS, M. J., Heidinger, A. K., & Sieglaff, J. (2013). Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(3), 1436-1458.

PAVOLONIS, Michael J.; Sieglaff, Justin and Cintineo, John. Spectrally Enhanced Cloud Objects - A generalized framework for automated detection of volcanic ash and dust clouds using passive satellite measurements: 2. Cloud object analysis and global application. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume: 120, Issue: 15, 2015, pp.7842-7870. Reprint # 7478.

PAVOLONIS, Michael J.; Sieglaff, Justin and Cintineo, John. Spectrally Enhanced Cloud Objects - A generalized framework for automated detection of volcanic ash and dust clouds using passive satellite measurements: 1. Multispectral analysis. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume: 120, Issue: 15, 2015, pp.7813-7841. Reprint # 7477.

PFEIFFER, T.; COSTA, A.; MACEDONIO, G. A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, vol. 140, no 4, p. 273-294.

PRATA, A. J.; PRATA, A. T. Eyjafjallajökull volcanic ash concentrations determined using Spin Enhanced Visible and Infrared Imager measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, vol. 117, no D20.

RIVERA, M. (2010). "Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas". Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

SMN, 2022. Curso de modelado de dispersión del Servicio Meteorológico Nacional.

SUZUKI T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra. In: Shimozuru, D., Yokoyama, I. (Eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93- 113.

SKAMAROCK, W. C., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR.

WILKS, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed.). Academic Press.

WILSON L. y Huang T. C., 1979: The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 44, 311–324, doi:10.1016/0012-821X(79)90179-1.

WOODHOUSE, M. J., et al. Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, vol. 118, no 1, p. 92-109.