

Análisis del transporte y la dispersión de ceniza y SO₂ de origen volcánico en la atmósfera.

Javier Blanco-Portals^{1*}, Carlos Otero-Casal², Daniel Garaboa-Paz², Jorge Eiras-Barca²,
Gonzalo Miguez-Macho^{2*}

*javier.blanc.port@gmail.com, gonzalo.miguez@usc.es

¹Grado en Física, Universidade de Santiago de Compostela; Galicia, España.

²Grupo de Física No Lineal, Universidade de Santiago de Compostela; Galicia, España.

RESUMEN

Las erupciones volcánicas son fenómenos naturales de alta importancia para el Sistema Climático por sus efectos a corto, medio y largo plazo. Estas erupciones también pueden provocar el cierre total o parcial del espacio aéreo sobre las regiones afectadas, causando pérdidas cuantiosas y afectando a las comunicaciones. El modelo meteorológico de escala sinóptica con acople de emisiones *WRF-Chem* es usado en este trabajo para la simulación de la erupción de los volcanes Eyjafjallajokull (Islandia) y Tambora (Indonesia), con el objetivo de analizar la dispersión de ceniza en la atmósfera, asociada a cada uno de ellos. Se observa que en la erupción del volcán islandés, la atmósfera baroclínica dispersa las cenizas de una forma muy rápida y hacia grandes extensiones geográficas. Este hecho se ve especialmente favorecido para el caso de las cenizas de menor calibre, que al alcanzar la alta troposfera se ven sometidas a los efectos de la corriente en chorro o *Jet Stream* polar, en cuyo seno las cenizas son transportadas a gran velocidad, incrementando la dispersión. En el caso del volcán indonesio, la atmósfera barotrópica favorece que el tiempo de residencia sea muy superior, y muy inferior el área a lo largo de la cual materia eyectada se ve dispersada.

Palabras Clave: WRF-Chem, erupción, circulación general, dispersión de ceniza.

1. Introducción

Las erupciones volcánicas se encuentran entre los eventos naturales más violentos y con mayor potencial de daño, tanto en infraestructuras como en vidas humanas, debido a la abrupta liberación de materia y energía que a ellas acompaña.

Adicionalmente, los volcanes son una importante fuente de emisión de gases

tóxicos y de efecto invernadero como el dióxido de azufre (SO₂) o el dióxido de carbono (CO₂), pudiendo afectar al sistema climático no sólo a corto, sino a medio y largo plazo. Como ejemplo, puede tomarse la erupción del volcán Laki (Islandia, entre 1783 y 1784), el cual se estima que eyectó a la atmósfera una cantidad aproximada de 122 megatonnes de SO₂ a lo largo de un período de más de 5 meses. El SO₂ reaccionará

con el agua contenida en la atmósfera, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4). Éste ácido puede precipitar en forma de lluvia ácida y causar daños a la vegetación o daños atópicos a personas y animales, permaneciendo además en suspensión un largo tiempo, así como siendo transportado a otras regiones. Este aerosol de H_2SO_4 absorbe y refleja parte del espectro de radiación solar causando una disminución de la temperatura en superficie a corto plazo. Como consecuencia de la erupción del citado Laki, se registraron anomalías negativas de temperatura de $1,5^\circ C$ en verano y hasta $4^\circ C$ en invierno sobre el continente europeo y algunas regiones americanas; ocasionando importantes disminuciones en la actividad agrícola, que causaron una hambruna generalizada (*Thordarson and Self, 2003*).

El continuo crecimiento del tráfico aéreo, y también la dependencia social y económica de nuestra civilización hacia el mismo, convierten a las erupciones volcánicas en un factor estratégico. Baste con recordar el reciente evento de erupción del volcán Eyjafjallajokull en abril de 2010 (*Sammonds P and Stephen, 2010; Webley et al., 2012; Stuefer et al., 2012*), situado al sur de Islandia. La erupción mantuvo la mayor parte del espacio aéreo europeo cerrado a lo largo de un período de 9 días, produciendo pérdidas millonarias tanto para las compañías aéreas como para empresas cuya distribución de productos estaba ligada al transporte aéreo (*Sammonds P and Stephen, 2010*). La circulación general de la atmósfera, las condiciones sinópticas predominantes, la estabilidad e incluso la posición de la tropopausa son factores determinantes a la hora de explicar cuestiones como el tiempo de permanencia de la ceniza en la atmósfera, el alcance del transporte o su direccionalidad (*Holton and Hakim, 2012;*

Wallace and Hobbs, 2006; Salby, 2012).

Quedando clara la importancia de los efectos que las erupciones volcánicas pueden producir, queda sólo mejorar el conocimiento y la predictibilidad del comportamiento tanto de la ceniza como el del SO_2 tras una erupción volcánica dentro de la circulación general de la atmósfera (*Sigurdsson et al., 2015*).

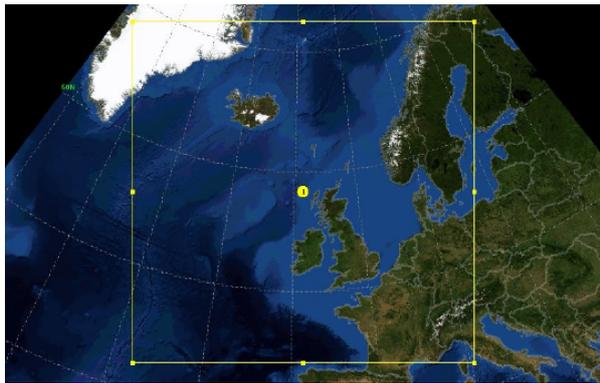
En este artículo se muestra la factibilidad de realizar predicciones acerca del comportamiento del material eyectado a la atmósfera tras una erupción volcánica, estimando la precisión del modelo numérico y su capacidad para reproducir la dispersión de ceniza. Para ello, se utilizó el modelo *WRF* (sistema numérico de predicción meteorológica a mesoescala) acoplado al módulo de emisiones *Chem*, para la inclusión del material eyectado en la simulación (*Sammonds P and Stephen, 2010; Webley et al., 2012; Stuefer et al., 2012*).

El artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta los métodos utilizados en la simulaciones, así como los detalles sobre la configuración del modelo utilizado, los volcanes seleccionados, y las erupciones. La sección 3 presenta los resultados obtenidos en la simulación, que serán comentados junto a las conclusiones en la sección 4.

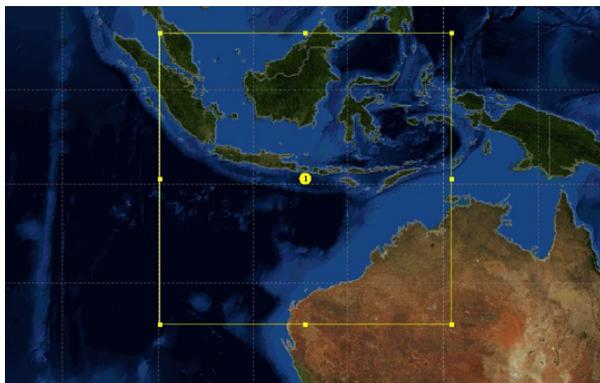
2. Métodos

Para los volcanes Eyjafjallajokull ($63^\circ 38' N$ $19^\circ 36' W$, 1666m) y Tambora ($8^\circ 16.6' N$ $117^\circ 59.5' E$, 2850m) se simulan dos erupciones de 4 *Volcanic Explosive Index* (en adelante VEI)¹, y se eligen períodos de simulación coincidentes con el período eruptivo del Eyjafjallajökull de abril de 2010 (*Sammonds P and Stephen, 2010; Webley*

et al., 2012; *Stuefer et al.*, 2012).



(a) Dominio Eyjafjallajökull



(b) Dominio Tambora

Fig. 1: (a) Proyección Lambert-conformal del dominio simulado en la erupción del Eyjafjallajökull. (b) Proyección de Mercator para el dominio simulado en el caso del Tambora.

La importancia de elegir para ambas simulaciones el mismo VEI reside en el hecho de poder comparar los resultados en función únicamente de la posición geográfica de ambos volcanes, partiendo así de una cantidad y de una altura inicial alcanzada por la masa eyectada iguales (mismas condiciones iniciales para las erupciones). De esta manera, la evolución de la ceniza tras la erupción estará únicamente sujeta al comportamiento de la atmósfera a escala regional; con la

presencia de estructuras baroclínicas (como los frentes) para las latitudes elevadas del Eyjafjallajökull, y de vientos sinópticos y corrientes convectivas en una atmósfera barotrópica para las latitudes bajas del Tambora.

El *Weather Research and Forecasting Model* (en adelante WRF) es configurado para tomar como condiciones iniciales y de contorno los datos suministrados por el *Global Forecasting System* (GFS), discretizando un dominio tridimensional de simulación de 18 km de resolución, con las parametrizaciones de microfísica, cúmulos, superficie, capa límite y radiación siguientes:

- Esquema WSM3 para la microfísica (*Hong et al.*, 2004).
- Esquema MM5 para la capa de superficie. Parametrización revisada de Monin-Obukhov (*Jiménez et al.*, 2012).
- Esquema de YSU para la convección en la capa límite planetaria (*Shin et al.*, 2012).
- Esquema de Dudhia para la radiación de onda corta (*Dudhia*, 1989).
- Esquema RRTM para la radiación de onda larga (*Mlawer et al.*, 1997).

La proyección Lambert-Conformal fue escogida para el caso del Eyjafjallajökull, mientras que para el caso del Tambora se optó por una proyección Mercator, para minimizar la aberración latitudinal. El acople del paquete *Chem* a WRF es usado

¹La escala de intensidad de erupción volcánica aceptada divide las erupciones entre los 0 VEI y los 8 VEI, habiendo alcanzado el Tambora la mayor intensidad de erupción registrada en la historia, con un valor de 7 VEI.

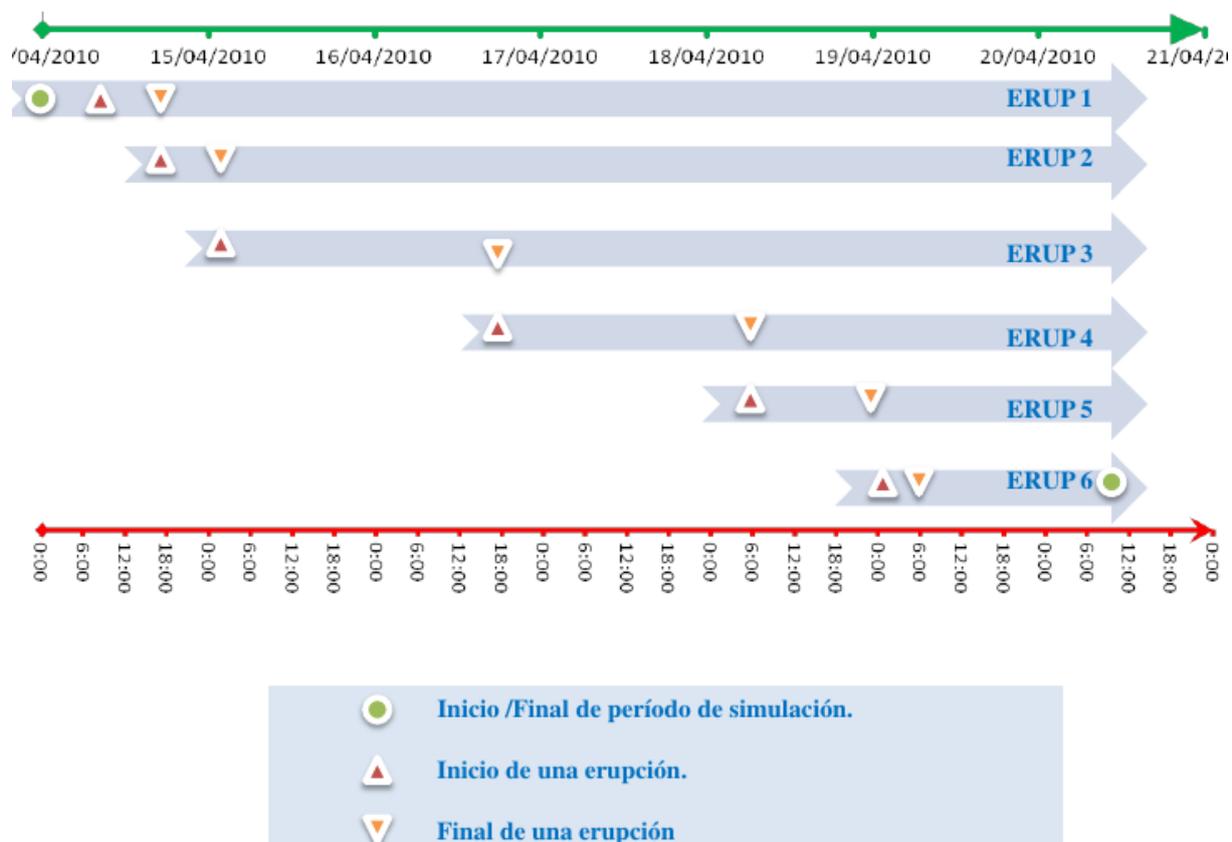


Fig. 2: Esquema del período de simulación.

con el objetivo de la inclusión de las cenizas y el SO_2 en las simulaciones. Las cenizas serán tratadas como partículas de polvo dispersables, sin utilizar las opciones de acople con los módulos para el tratamiento de aerosoles y evitando las interacciones químicas y mecanismos de deposición disponibles. Así se consigue optimizar el tiempo de simulación (Stuefer *et al.*, 2012). La Figura 1 muestra los dominios de simulación seleccionados.

Las simulaciones tendrán en cuenta la distribución de la ceniza por calibre expresada en Mastin *et al.* (2009) y expresada en la Tabla 1, y son desarrolladas con 6 erupciones para cada caso, con el fin de asemejarse lo máximo posible a la realidad, tomando como referencia la última erupción del Eyjafjallajokull. Los detalles de las simulaciones son contemplados en la Tabla 3 y en la Figura 2.

Además de realizar ambas simulaciones suponiendo el mismo VEI, también se supone la misma composición para ambas nubes de ceniza eyectadas (Tabla 1); estando la erupción clasificada como S2 según la base de datos de Mastin, que contiene otras 10 posibles categorías. Esta clasificación tiene en cuenta no solo la altura y cantidad de masa expulsada, si no también la composición y calibre de las cenizas (Mastin *et al.*, 2009). A pesar de tratarse de estratovolcanes, el registro histórico de erupciones indica una composición y VEI (ambos relacionados) muy diferente para ambos. Sin embargo, el simular los dos casos bajo las mismas condiciones tiene el objetivo antes mencionado de poder comparar los resultados, en función únicamente del comportamiento atmosférico asociado a sus latitudes.

Bin	Diámetro de las partículas por bin	Porcentaje de masa
1	1 a 2 mm	22
2	0.5 a 1 mm	5
3	0.25 a 5 mm	4
4	125 a 250 μm	5
5	62.5 a 125 μm	24.5
6	31.25 a 62.5 μm	12
7	15.625 a 31.25 μm	11
8	7.8125 a 15.625 μm	8
9	3.9065 a 7.8125 μm	5
10	<3.9 μm	3.5

Tabla 1: Distribución de las especies de cenizas para las erupciones. Volcán tipo S2 según la clasificación de Mastin

Etiqueta	Rango de alturas por capa
L_1 -Baja Troposfera	0 a 1682 m
L_2 -Media Troposfera	2049 a 8224 m
L_3 -Alta Troposfera	8944 a 15753 m
L_4 -Tropopausa	16530 a 20463 m

Tabla 2: División del dominio simulado en 4 niveles verticales para el análisis de la dispersión de ceniza.

Erupciones	Fecha - hora (UTC) de inicio	Duración (h)	Altura sobre el cráter (m)	Masa total eyectada (kg)
1	14/04/2010 - 09:00	9	9000	2.06E+10
2	14/04/2010 - 18:00	9	5500	1.25E+09
3	15/04/2010 - 03:00	42	6000	9.04E+09
4	16/04/2010 - 18:00	36	8250	4.60E+10
5	18/04/2010 - 06:00	18	5000	1.33E+09
6	19/04/2010 - 00:00	6	4000	1.78E+07

Tabla 3: Parámetros de configuración de las erupciones, tanto para el Eyjafjallajokull como para el Tambora.

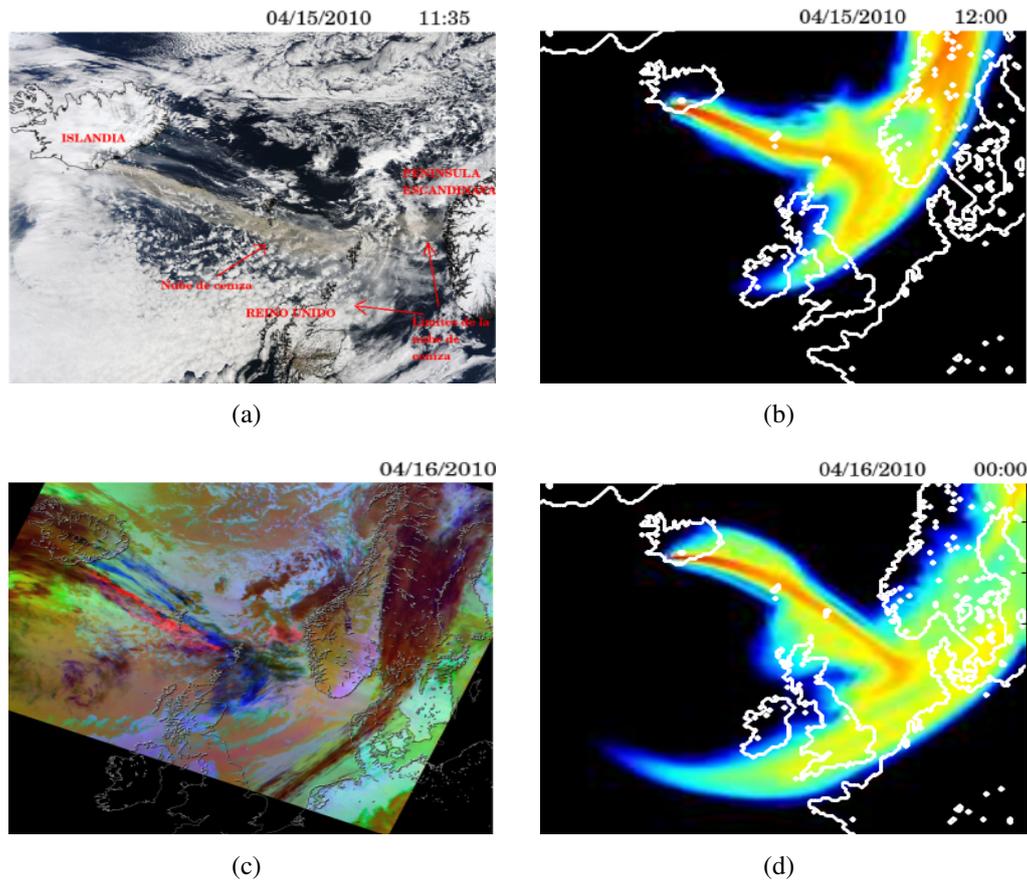


Fig. 3: (a): Imágen de satélite 15 de abril de 2010 (canal visible). (b) : Salida del modelo para el 15 de abril de 2010. (c): Imágen de satélite 16 de abril de 2010 (canal infrarrojo). (d): Imágen de satélite 16 de abril de 2010 (canal infrarrojo).

Dado que el primer orden de importancia en el estudio del comportamiento de las cenizas viene dado por el calibre de las mismas; la concentración de éstas será estudiada en función del mismo. Esto permitirá hacer una comparación más detallada entre la erupción de ambos volcanes. De la misma manera, y para precisar más en el análisis y en la comparación; la troposfera será dividida en 4 niveles verticales; siendo el nivel L1 el más cercano al suelo, y el nivel L4 el que incorpore la tropopausa, como se observa en la Tabla 2. También será analizada la dispersión horizontal de la concentración media de ceniza, con el

objetivo de determinar aquellas regiones que han sufrido un impacto mayor, y con ello, en la que estaría justificado un eventual corte del espacio aéreo. Para ello se obtendrán conclusiones dividiendo la columna en baja, media y alta troposfera.

Finalmente, y con el objetivo de validar las salidas del modelo, se han obtenido imágenes de satélite (MODIS-NASA) de los días de interés.

3. Resultados

La Figura 3 muestra como la salida del modelo se ajusta a las observaciones tanto de los canales visible como infrarrojo para el caso de Islandia, teniendo una

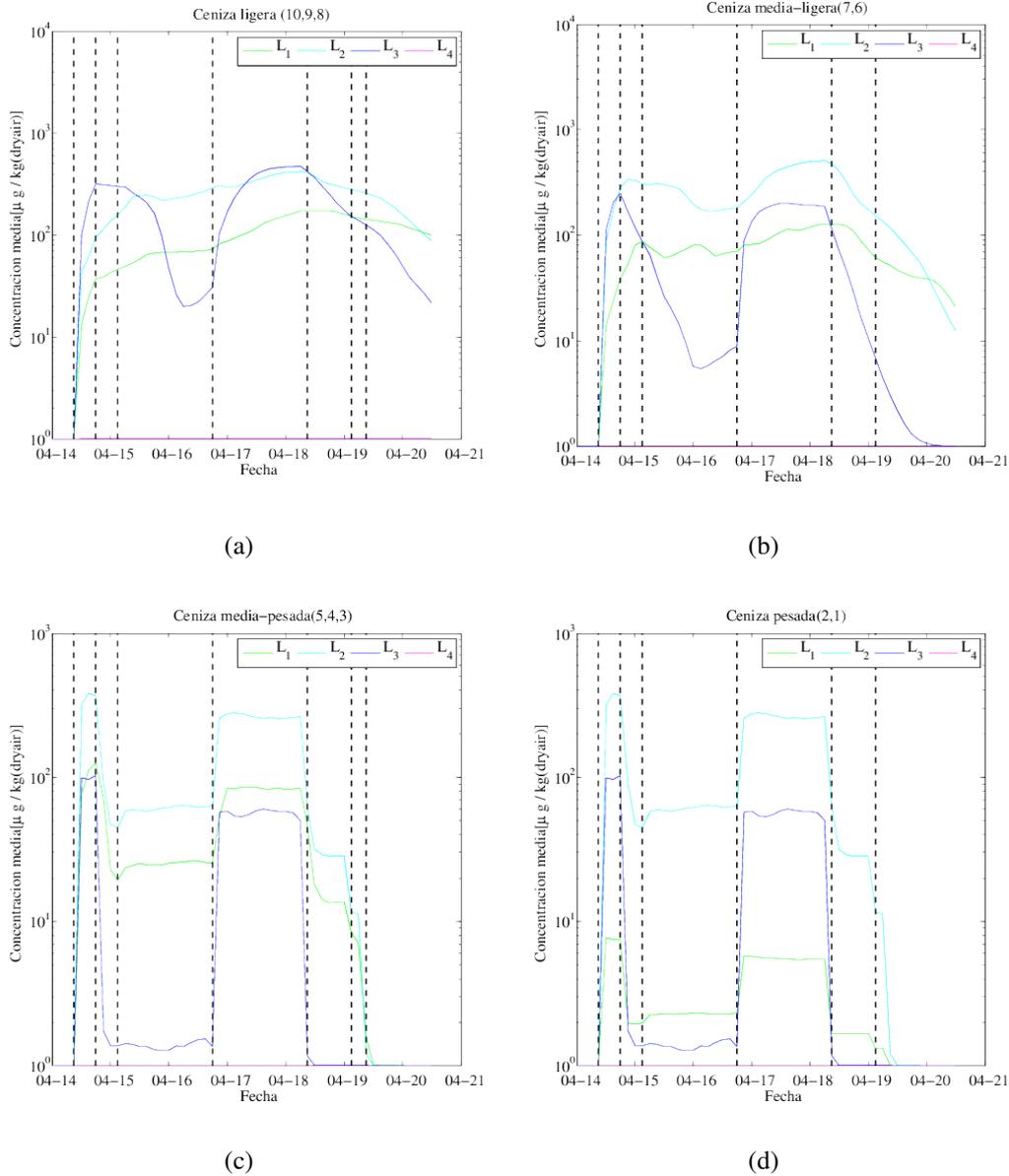


Fig. 4: Concentración de cenizas por calibres para la simulación del Eyjafjallajokull. Ceniza ligera (a), ceniza media-ligera (b), ceniza media-pesada (c) y ceniza pesada (d) son presentadas independientemente. Los niveles de altura de L_1 a L_4 se especifican en la Tabla 2.

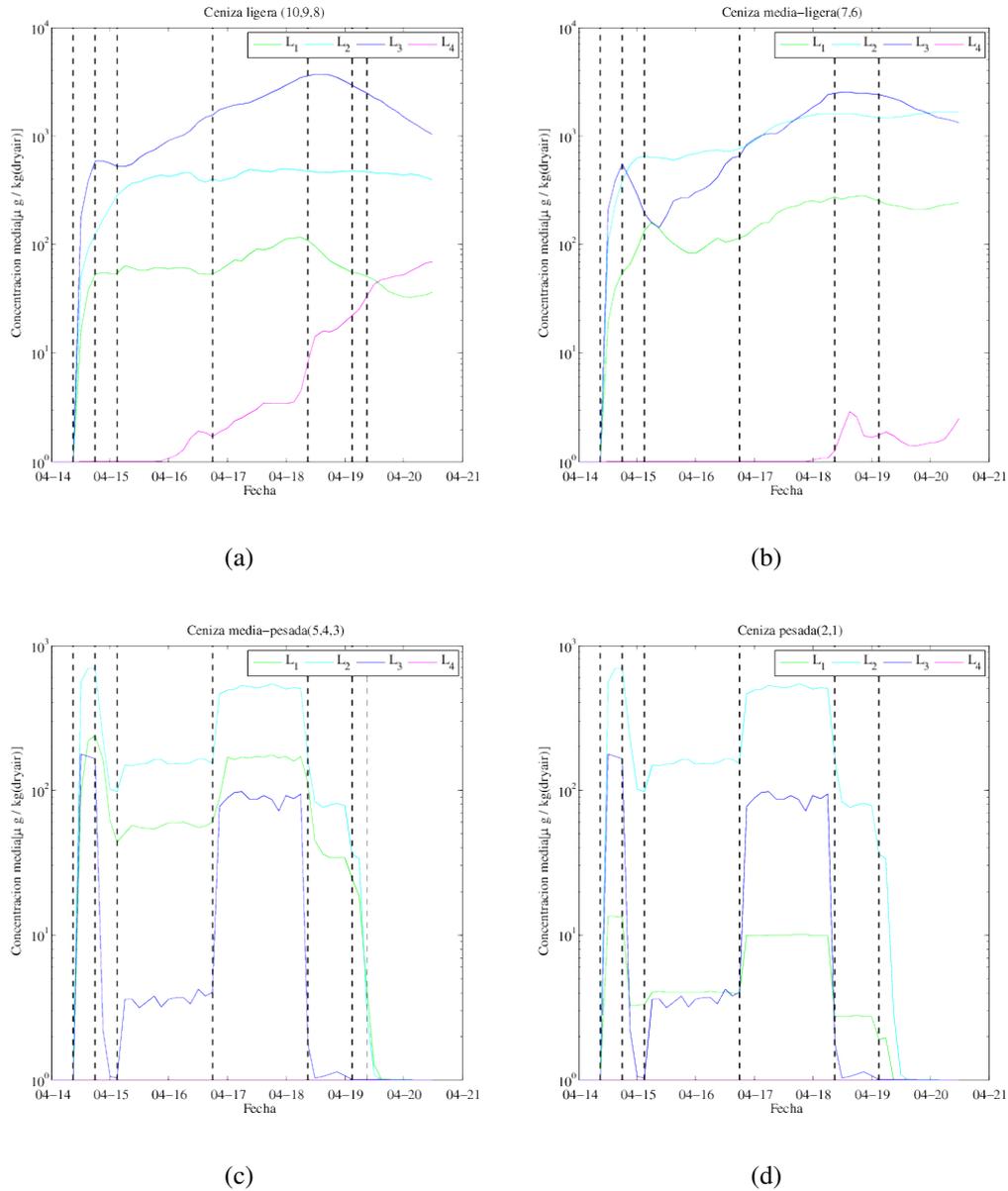


Fig. 5: Concentración de cenizas por calibres para la simulación del Tambora. Ceniza ligera (a), ceniza media-ligera (b), ceniza media-pesada (c) y ceniza pesada (d) son presentadas independientemente. Los niveles de altura de L_1 a L_4 se especifican en la Tabla 2.

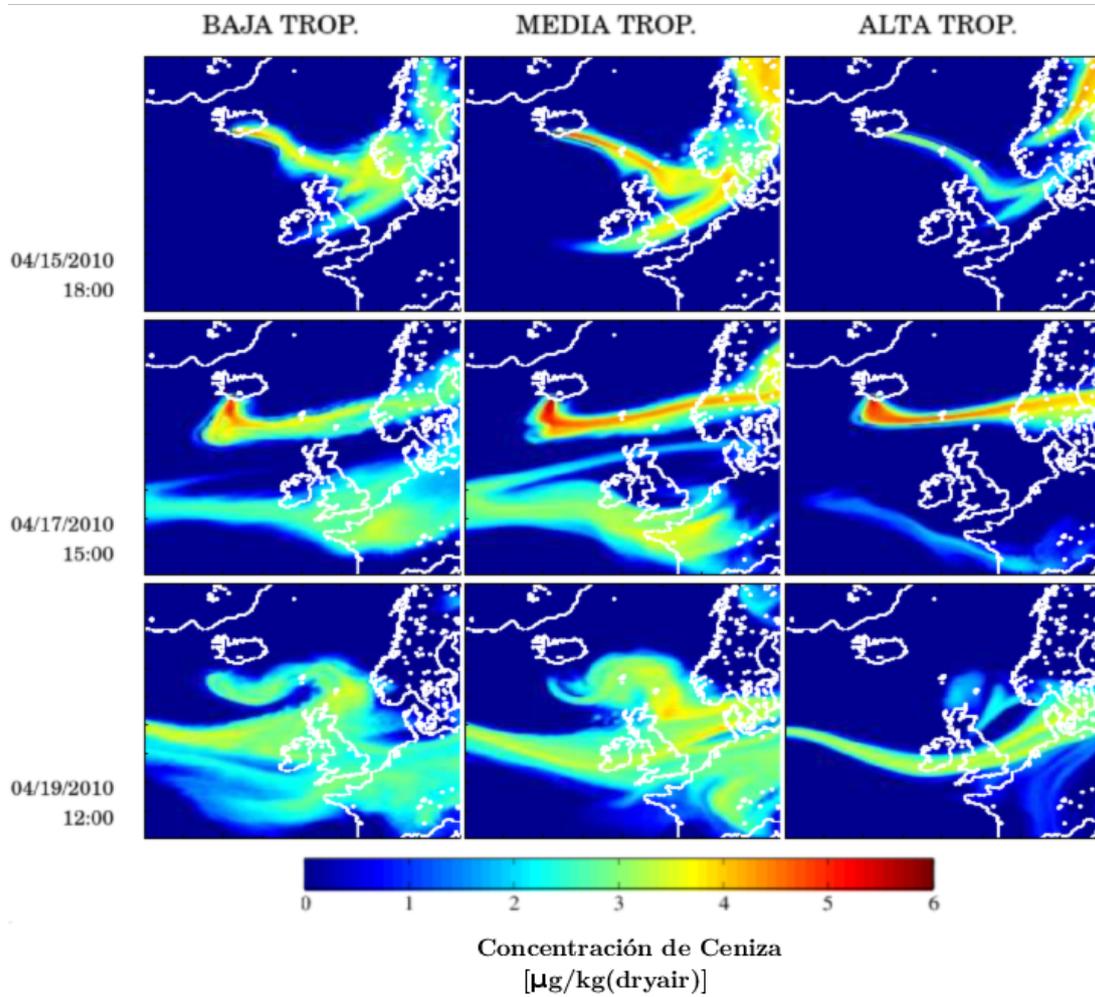


Fig. 6: Evolución del total de la ceniza eyectada por el volcán Eyjafjallajökull. La concentración de ceniza se presenta en escala logarítmica (\log_{10}). Baja, media y alta troposfera hacen referencia a los niveles de altura para las cenizas (ver Tabla 2).

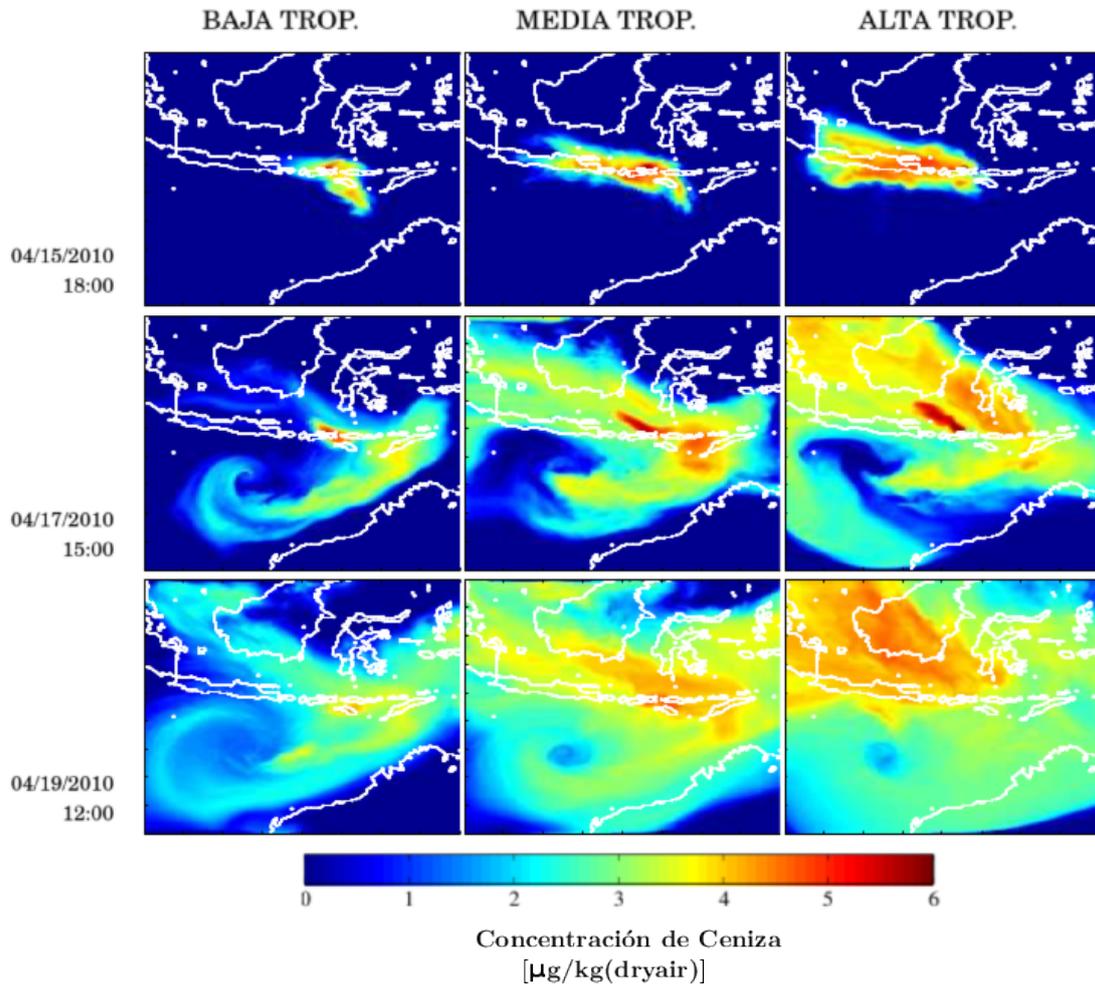


Fig. 7: Evolución del total de la ceniza eyectada por el volcán Tambora. La concentración de ceniza se presenta en escala logarítmica (\log_{10}). Baja, media y alta troposfera hacen referencia a los niveles de altura para las cenizas (ver Tabla 2). Nótese la presencia de vorticidad asociada a la formación de una tormenta tropical en la parte inferior izquierda del dominio de simulación.

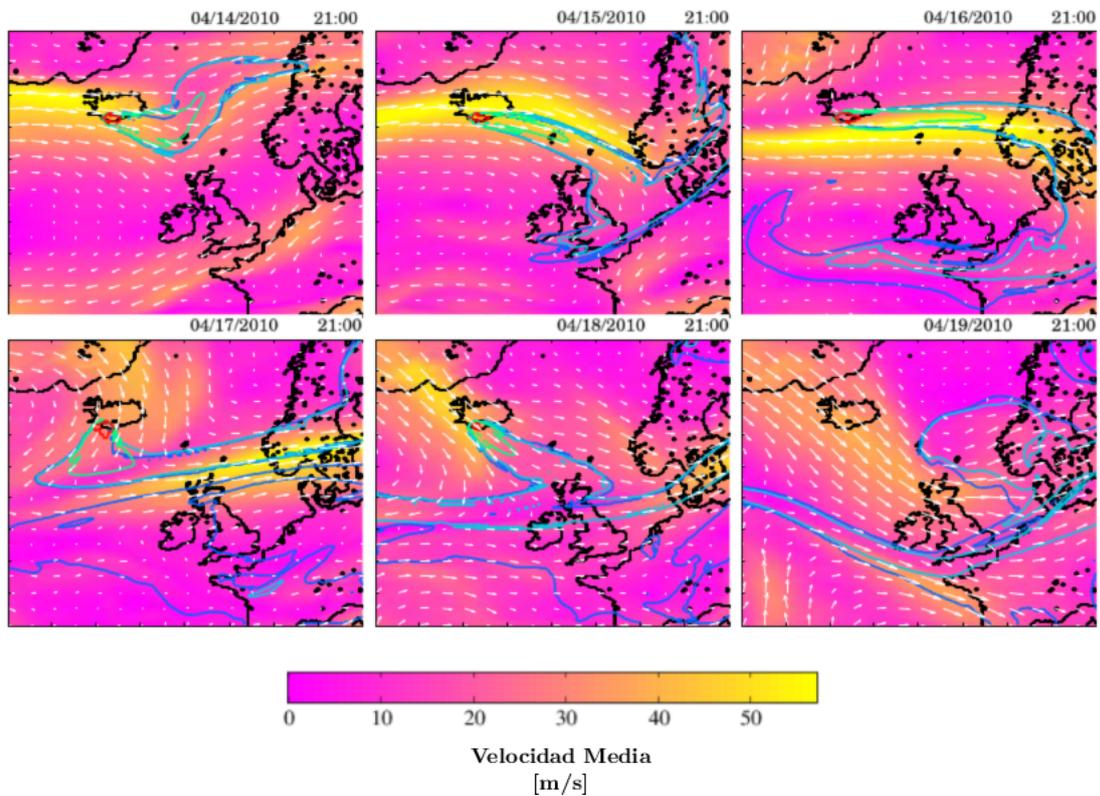


Fig. 8: Dispersión de las cenizas a lo largo de la corriente en chorro polar. Los contornos de color representan el área cubierta por la ceniza eyectada: en rojo la ceniza pesada, en verde la media-pesada, en azul cian la media-ligera y en azul oscuro la ligera; integrando un intervalo de altura que va de 6783 a 8944 m . Para el mismo intervalo de alturas, la escala de colores hace referencia a la velocidad media de las masas de aire en la atmósfera. Las flechas representan la dirección local de la velocidad del aire, y su longitud es proporcional al módulo de la velocidad media.

validación inicial de que el modelo refleja el comportamiento general del transporte de la ceniza.

3.1. Concentración de las Cenizas

Con respecto a la concentración de las cenizas, mostrada en la Figura 4 para el caso del Eyjafjallajokull, y en la Figura 5 para el caso del Tambora; el resultado más evidente a la vista de las gráficas es que el comportamiento de las cenizas entre los calibres 5 y 1 –correspondientes a las más pesadas– es prácticamente idéntico en ambos volcanes. En el momento que cesa la inyección de ceniza a una determinada altura, cae a tierra en un período menor a 3 h (frecuencia de salida del modelo). Esto se refleja en que las concentraciones medias describen un comportamiento escalonado.

Por contraposición, el comportamiento de los calibres ligeros es muy diferente. En primer lugar, para el Eyjafjallajokull la concentración media es 1 orden de magnitud menor en todos los niveles que para el Tambora. La causa de esta diferencia viene marcada, como sería esperable, por la presencia de la corriente el chorro polar y por una atmósfera baroclínica en el primer caso, lo cual ayuda a la dispersión de la ceniza. Por el contrario, el segundo caso ocurre en una atmósfera barotrópica, sin frentes y con la frecuente presencia de corrientes convectivas ascendentes que colaboran en la permanencia de la ceniza en la atmósfera.

3.2. Dispersión de la ceniza

Las Figuras 6 y 7 muestran la evolución en la dispersión de la ceniza para el caso del Eyjafjallajokull y del Tambora respectivamente. La diferencia en la

evolución de la ceniza del Eyjafjallajokull y del Tambora es apreciable. Mientras que en el primer caso se observa un patrón que se ajusta a la presencia en la zona de la corriente en chorro polar, en el segundo se ve una dispersión no direccional. Además, para el primero el transporte se produce a mayor velocidad (en el seno de la corriente en chorro) que para el segundo. Esta particularidad se observa claramente en el segundo *time step*, donde para el Eyjafjallajokull la ceniza ya ha sido transportada fuera del dominio en una cantidad importante y para el Tambora se ha repartido de forma más uniforme. También puede observarse como el tiempo de residencia en la atmósfera es muy superior en el segundo caso. Este comportamiento coincide con el registrado en abril de 1815, en el que una erupción VEI 7 en el Tambora dispersó en la atmósfera (a nivel global) una gran cantidad de ceniza; que permaneció en suspensión un período de tiempo aproximado de 3 años, provocando una bajada de temperaturas medias.

Una mención final a parte merece la naturaleza de la dispersión de ceniza por medio de la corriente en chorro, presentada en la Figura 8. La imagen muestra una corriente en chorro bien definida en un nivel de altura entre 6783 y 8944 metros que se encarga de la dispersión zonal de la ceniza a lo largo de una amplia extensión². Puede observarse también como los calibres ligeros (azul) son los que más rápidamente son alejados del punto de erupción, al haber adquirido mayor altura que los pesados.

4. Conclusiones y Discusión

En este artículo se han mostrado los resultados de dos simulaciones para la eyección y posterior dispersión de ceniza

²Estas observaciones corresponden, naturalmente, al tiempo de simulación estudiado. En el caso del Tambora también es esperable que se produzca una dispersión de la ceniza a lo largo una amplia extensión, aunque de una manera mucho más espaciada en el tiempo.

por parte de un volcán situado en una atmósfera baroclínica (Eyjafjallajökull) y un volcán situado en una zona tropical con atmósfera barotrópica (Tambora) tomando como referencia la erupción real del primero en el año 2010. Esta erupción causó un elevado impacto económico y social al provocar el cierre del espacio aéreo de parte de Europa durante varios días, demostrando la importancia de conocer adecuadamente la naturaleza de estos fenómenos, así como su evolución. Se prueba que el modelo meteorológico de escala sinóptica WRF, acoplado a un modelo de emisión (WRF-Chem) se presenta como una herramienta útil en esta empresa, habiéndose validado las salidas de este modelo con imágenes de satélite.

La latitud y altura de las erupciones volcánicas son factores determinantes para la forma en la que es transportado y dispersado el material eyectado. La latitud –y también, aunque en menor medida, la continentalidad marcada por la longitud– será determinante al situar la eyección en una atmósfera baroclínica o en una atmósfera barotrópica. En el primer caso, la presencia de estructuras baroclínicas (y muy especialmente la posible presencia de una corriente en chorro en altura) causarán que la ceniza sea dispersada con mayor velocidad pero también a una gran distancia del punto de eyección. Por el contrario, en una atmósfera barotrópica, la ausencia de fuertes vientos sinópticos y la habitual presencia de corrientes convectivas harán que el tiempo de residencia de la ceniza sea muy superior, y también muy inferior su dispersión a corto plazo (no así, probablemente, a largo plazo).

Una futura mejora de estas simulaciones vendrá dada por el acoplamiento de una herramienta que permita evaluar las reacciones químicas, resolviendo la

formación de H_2SO_4 , y el impacto que su presencia en la atmósfera pudiere tener. Debido a la relativamente alta capacidad de cómputo que la herramienta presentada requiere, ésta no es idónea para analizar los efectos de enfriamiento y calentamiento a corto y largo plazo que las erupciones volcánicas causan sobre el sistema climático, terreno en el que otras herramientas globales han probado una sobrada eficacia.

Agradecimientos

Las simulaciones se han llevado a cabo en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA). Los autores agradecen a este centro el soporte y el apoyo recibido en la realización de las mismas. Los autores quieren finalmente agradecer las aportaciones y críticas constructivas recibidas por parte de dos revisores anónimos, que han ayudado a mejorar sustancialmente la versión final del artículo.

Referencias

- Dudhia, J. (1989), Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077–3107.
- Holton, J. R., and G. J. Hakim (2012), *An introduction to dynamic meteorology*, vol. 88, Academic press.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen (2004), A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103–120.
- Jiménez, P. A., J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Montávez, and E. García-Bustamante (2012), A revised scheme for the wrf

- surface layer formulation, *Monthly Weather Review*, 140(3), 898–918.
- Mastin, L., M. Guffanti, R. Servranckx, P. Webley, S. Barsotti, K. Dean, A. Durant, J. Ewert, A. Neri, W. Rose, D. Schneider, L. Siebert, B. Stunder, G. Swanson, A. Tupper, A. Volentik, C.F. Waythomas. (2009), 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*, 186(1), 10–21.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 102(D14), 16,663–16,682.
- Salby, M. L. (2012), *Physics of the Atmosphere and Climate*, Cambridge University Press.
- Sammonds P, M. B., and E. Stephen (2010), Volcanic hazard from iceland: Analysis and implications of the Eyjafjallajökull eruption, *Tech. rep.*, UCL Institute for risk and disaster reduction.
- Shin, H. H., S.-Y. Hong, and J. Dudhia (2012), Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary layer parameterizations, *Monthly Weather Review*, 140(2), 664–682.
- Sigurdsson, H., B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, and J. Stix (2015), *The encyclopedia of volcanoes*, Elsevier.
- Stuefer, M., S. Freitas, G. Grell, P. Webley, S. Peckham, and S. McKeen (2012), Inclusion of ash and SO₂ emissions from volcanic eruptions in wrf-chem: development and some applications, *Geoscientific Model Development Discussions*, 5(3), 2571–2597.
- Thordarson, T., and S. Self (2003), Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: a review and reassessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 108(D1), AAC–7.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs (2006), *Atmospheric science: an introductory survey*, vol. 92, Academic press.
- Webley, P., T. Steensen, M. Stuefer, G. Grell, S. Freitas, and M. Pavolonis (2012), Analyzing the Eyjafjallajökull 2010 eruption using satellite remote sensing, lidar and WRF-Chem dispersion and tracking model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 117(D20).