

METODOLOGÍA PARA SIMULAR LA DISPERSIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA ATMÓSFERA*

METHODOLOGY SIMULATE THE DISPERSION OF VOLCANIC ASH IN THE ATMOSPHERE

Julio Alexander Argoti Álvarez**

Docente Programa Ingeniería Ambiental y Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia

Fecha de recepción:

11 de junio de 2012

Fecha de aprobación:

18 de septiembre de 2012

Palabras clave:

Aerosoles volcánicos, cenizas volcánicas, Fall3d, plumas volcánicas, tiempo de investigación y prospectiva.

RESUMEN

El presente documento corresponde a una revisión bibliográfica sobre algunas experiencias de investigadores, que han desarrollado modelos que permiten hacer simulaciones de tipo numérico y que se realizan mediante grandes y complejos procesos computacionales. Se inicia el documento con la explicación sobre los conceptos de modelación y simulación, y vulcanismo explosivo, se explica las consecuencias que genera la ceniza en la vida del hombre. Posteriormente, se indican los modelos matemáticos y computacionales que se utilizan para la modelación y simulación de las cenizas y los aerosoles volcánicos en la atmósfera; después, a través de ejemplos, se caracteriza la dinámica meteorológica y de cenizas en la atmósfera. Por último, se resalta la importancia de la validación de las simulaciones y modelaciones, con elementos reales de los fenómenos de estudio; finalmente, se concluye cómo postular esta metodología de simulación de cenizas volcánicas, como una adecuada herramienta para procesos de pronósticos de la dinámica de la dispersión de cenizas volcánicas y de esta manera, proponer un instrumento útil para la toma de decisiones en el caso de erupciones volcánicas.

Key words:

Volcanic aerosols, volcanic ash, Fall3d, volcanic plumes, Weather Research and Forecasting.

ABSTRACT

This document corresponds to a bibliographical review on some experiences of researchers, have developed models that allow numerical simulations that are performed using large and complex computational processes. Document starts with the explanation of the concepts of modeling and simulation and explosive volcanism. Explaining the effect the ash generated in the life of man. Then lists, the mathematical and computational models used for modeling and simulation of ash and volcanic aerosols in the atmosphere; then, through examples, characterize the dynamic weather and ash in the atmosphere. Last, it highlights the importance of validation of simulations and modeling with real elements of the phenomena of study; finally, apply this methodology concludes with simulation of volcanic ash, as a suitable tool for process dynamics forecasting volcanic ash dispersion and thus, propose a useful tool for decision making in the case volcanic eruptions.

* Artículo de Revisión Bibliográfica.

** Especialista en Orientación Educativa y Desarrollo Humano, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia; Ingeniero de Sistemas y Licenciado en Matemáticas, San Juan de Pasto, Colombia.

Correo electrónico: Alexander.Argoti@gmail.com

El fenómeno de dispersión y caída de ceniza volcánica en la atmósfera, afecta seriamente zonas agrícolas y ganaderas, produce obstrucción de vías, se contaminan quebradas y ríos; con ello se puede afectar la salubridad de la población, en condiciones de humedad puede ocasionar el colapso de los techos y estructuras, pueden fallar las redes telefónicas, eléctricas y las telecomunicaciones. La caída de cenizas afecta directamente a la salud, como es el caso de los elementos tóxicos como fluorina, que puede causar silicosis y otras enfermedades respiratorias; también, puede afectar la aeronavegación, ya que esta puede causar averías en los aviones, por la abrasión que ella hace en su paso, al ingresar dentro de los motores, esto genera la posibilidad de que el transporte aéreo sufra dificultades al pasar por una columna de ceniza.

La gran mayoría de estudios del fenómeno volcánico, están definidos desde registros geológicos, los cuales muestran el comportamiento de las placas tectónicas en fechas y momentos históricos, y son la causa de las erupciones de un volcán, desde ellos se construyen mapas de amenaza volcánica que muestran áreas de afectación para las comunidades. La dispersión y caída de cenizas volcánicas está directamente influenciada por la dinámica de la atmósfera en el momento de la erupción; es de resaltar que las condiciones atmosféricas son variables en los diferentes periodos del tiempo y, según la zona de ubicación del volcán en el planeta.

Los argumentos anteriores han generado un gran interrogante, frente a la necesidad de un sistema de pronóstico que permita inferir la forma y características de una erupción de cenizas volcánicas; de esta manera, las comunidades a nivel local y regional, tendrán una herramienta adecuada para tomar decisiones frente a este tipo de fenómeno.

Los sistemas de predicción para el caso de la caracterización de cenizas volcánicas en la atmósfera, se realizan a partir de modelos matemáticos que se resuelven mediante el uso de herramientas computacionales, sistemas que permiten realizar procedimientos de simulación, indicando posibles escenarios del comportamiento del fenómeno de estudio.

Este documento presenta una propuesta para la realización de un sistema de pronóstico de dispersión y caída de cenizas volcánicas; se realiza desde la caracterización de la dinámica atmosférica, mediante el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF).

WRF, los resultados obtenidos del proceso de modelación y simulación de WRF generan la información necesaria para los datos de entrada del modelo Fall3d, el que procesa y realiza la modelación matemática y la simulación del comportamiento de las cenizas volcánicas; de esta manera, se acoplan dos modelos: uno para la solución atmosférica (WRF) y otro para la dinámica de las cenizas volcánicas (Fall3d).

El resultado del proceso de modelación y simulación es la solución de las ecuaciones (de Advección-Difusión-Sedimentación y de Suzuki) que gobiernan el fenómeno de estudio; finalmente, estos resultados son teóricos a partir de unos datos iniciales, lo que promueve un proceso de validación o calibración de los mismos, esto se hace mediante comparaciones matemáticas-estadísticas, y entre los efectos de las simulaciones de Fall3d, confrontados contra imágenes de erupciones volcánicas registradas desde satélites o contra planos de concentraciones de cenizas volcánicas denominados Isópacas.

El estudio indica los modelos, la simulación y los procesos de validación, a partir de ejemplos de aplicación que se están desarrollando en varios volcanes del mundo. Con dicho objeto del estudio y los análisis de la dispersión y caída de cenizas volcánicas, este es un posible modelo que propone un sistema de pronóstico, que es muy útil en la toma de decisiones de la comunidad.

1. Dispersión y caída de cenizas volcánicas

Leonardo Boff (2008), narra en su obra: *La Opción-Tierra* los estudios del físico alemán Heinrich Schumann, donde se afirma que la tierra se encuentra rodeada por un complejo cinturón electromagnético, fruto de la interacción entre el sol, la tierra (sus suelos, el magma, las aguas, los ecosistemas...) y la parte inferior de la ionósfera, a unos 55 kilómetros (km) de altura. Dicho cinturón produce una resonancia más o menos constante, en las que influyen las variaciones que puedan acontecer, conocidas como resonancia Schumann, del orden de 7.8 hercios y equivalente a la vibración de las ondas cerebrales, propias de los mamíferos y de los seres humanos; es como si fuera el latido del corazón de la tierra, su marca pasos, que equilibra todas las relaciones que la vida mantiene con el conjunto de los seres y las energías; este equilibrio es fundamental: para la meteorología, para regular las estaciones, la vida

de los volcanes, el flujo y reflujo de los océanos y el movimiento de las placas tectónicas.

La dinámica de las placas tectónicas es la que causa la formación del sistema montañoso y de cordilleras, como es el caso de América Latina con su Cordillera de los Andes, la que está cerca de la Costa Pacífica y es fruto del fenómeno denominado abducción, en donde la placa de nazca entra haciendo presión sobre la base de la placa continental y genera a su vez la formación de todo el sistema volcánico andino.

Las erupciones volcánicas consisten esencialmente en la salida hacia la superficie terrestre y la atmósfera, de magma o material fluido, generado en el manto o al interior de su corteza; la liberación de grandes cantidades de gases contenidos en el magma, son los responsables de fenómenos de tipo explosivo, que pueden acompañar algunas veces a las erupciones volcánicas.

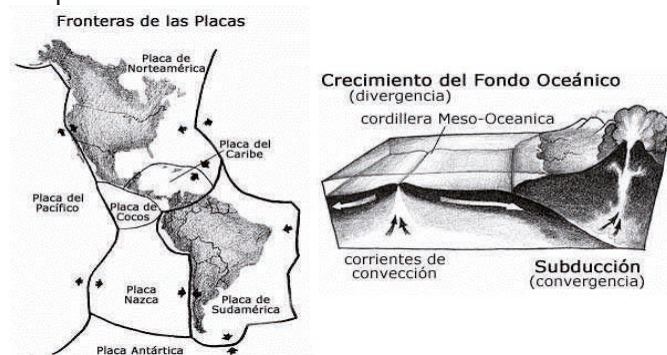


Figura 1. Placas Tectónicas.

Fuente: Carol Radford. Education Department San Diego Natural History Museum, 2010.

En el estudio realizado por algunos autores (A Folch, Jorba & Viramonte, 2008), se afirma que el vulcanismo explosivo, se caracteriza por la fragmentación del magma y la generación de material piroclástico: bloques, *tephra* y ceniza; vale la pena resaltar que en la Cordillera de los Andes se encuentran varios volcanes de tipo explosivo y algunos de ellos están en estado activo de manera permanente, como los volcanes de Colombia: Galeras, Nevado del Ruiz, Puracé, Nevado del Huila, Cumbal, Doña Juana o los volcanes del Ecuador: Reventador, Guagua Pichincha, Imbabura, entre otros volcanes del continente.

Ciertas investigaciones (Brown, Bonadonna & Durant, 2011), nos indican que un volcán genera *tephra* y ceniza desde una fragmentación que se produce por una rápida descompresión del magma, en el conducto volcánico durante su ascenso y a causa del colapso de

un domo de lava o de un edificio, lo que causa como lo mencionan Arnau Folch, Neri, Macedonio y Mart, 2000, una columna eruptiva de mezcla de gases líticos y piroclastos que son colocados en la atmósfera y dispersados según las condiciones de esta.



Figura 2. Erupción del Volcán Galeras, agosto 27 de 1936.
Fuente: archivo fotográfico de ingeominas.

Autores como A Folch, Costa y Basart, 2012, afirman que una vez en la atmósfera, se forma una nube de cenizas que se dispersa por advección del viento “movimiento de partículas en forma horizontal”; es muy importante la altura de inyección, difusión turbulenta, sedimentación, debido a que las partículas caen por gravedad con una velocidad terminal, también por otros fenómenos como la agregación, la formación de hidrometeoros, entre otros; de esta manera, se puede lograr la caracterización de estos aspectos de tipo físico desde modelos matemáticos.

Varios científicos (Sparks, Woods, Bursik, Carey, Sigurdsson, Glaze, & Gilbert, 1997), explican el fenómeno de la propagación y dispersión de ceniza dentro de la atmósfera, que resulta de la interacción con el movimiento atmosférico y las variables que se incluyen en la estratificación, a medida que la columna de ceniza sube de manera vertical, y también según el desplazamiento en el eje horizontal; el comportamiento de la ceniza en la atmósfera depende de los movimientos y variables atmosféricas durante su elevación, los primeros se pueden caracterizar de manera general en dos componentes: uno que se relaciona con el viento y otro con la turbulencia.



Figura 3. Erupción del Volcán Eyjafjallajökull, Indonesia, mayo de 2010.
Fuente: archivo fotográfico de Folch Arnau, 2011.

Investigadores como A Folch, et al., 2008, muestran en sus estudios cómo la caída de cenizas provoca muchos efectos indeseables, en especial, en las zonas de afectación de la ceniza, como: daño en asentamientos, colapso de techos, interrupción de vías de comunicación, daños en agricultura y ganadería, cierre de aeropuertos. Además, los autores (A Folch, Cavazzoni, Costa & Macedonio, 2008) en sus investigaciones indican el impacto de la presencia de cenizas en el aire, la afectación en su calidad y la amenaza en la navegación aérea.

En el trabajo de algunos científicos (Langmann, Folch, Hensch, & Matthias, 2012) se indican las características de la erupción de cenizas del Volcán Eyjafjallajökull en Islandia; en eventos sucedidos entre los meses de abril a mayo de 2010, el tráfico aéreo en Europa fue interrumpido varias veces, debido a la ceniza volcánica en la atmósfera; esta situación totalmente inusual lleva a la demanda de herramientas de gestión y de decisión; numerosas mediciones de aerosoles y cenizas mediante estaciones en tierra, por herramientas de teledetección, por satélites y hasta mediciones in-situ en toda Europa, han posibilitado hacer un seguimiento de las nubes de cenizas volcánicas durante la erupción del mencionado volcán. Esta investigación es un referente sobre la posibilidad de un trabajo interdisciplinario entre los vulcanólogos e investigadores de aerosoles y cenizas volcánicas, para analizar el fenómeno de dispersión de la ceniza en la atmósfera, con el fin de entender el impacto que causan las cenizas y los aerosoles.

La interrupción prolongada a la aviación durante la erupción del Volcán Eyjafjallajökull, en Islandia, en los meses de abril y mayo de 2010, hizo que los científicos se inquietaran sobre la prueba de herra-

mientas de pronóstico, para predecir la dinámica de la dispersión de cenizas volcánicas. Durante las últimas décadas se han generado una serie de incidentes, se ha encontrado que la ceniza volcánica es la causante de grandes daños, en especial en la pérdida de poder de los motores de las aeronaves; las concentraciones de ceniza han sido estudiadas, y los resultados han proporcionado información importante, para determinar límites máximos de concentración y para asegurar o garantizar el funcionamiento de los motores de los aviones. Para hacer estas afirmaciones, se han realizado investigaciones de aeronaves que se han interceptado con seis columnas de erupciones volcánicas, se ha encontrado que las concentraciones de ceniza predicha por los modelo de dispersión atmosférica son muy ajustadas o cercanas a los valores reales; las erupciones estudiadas son: *Galunggung* 1982, *Soputan* 1985, *Reducto* 1989, *Pinatubo* 1991, 2000 y *HeklaManam* 2006 (Witham, Webster, Hort, Jones & Thomson, 2012).



Figura 4. Cenizas del Volcán Puyehue de Chile, junio 16 de 2011.
Fuente: archivo fotográfico de Claudio Santana, 2011.

La ceniza producida por las erupciones volcánicas, lleva información importante sobre las condiciones subterráneas de magma eruptivo y las modificaciones posteriores de la nube volcánica durante el transporte atmosférico. La ceniza volcánica también se estudia por sus efectos sobre el medio ambiente y la salud humana; en particular, hay un creciente interés de la comunidad científica multidisciplinaria para comprender el papel que la deposición de ceni-

zas sobre las diferentes regiones, como es el caso de la afectación en los océanos, donde pueden desempeñarse como fuente biodisponible para la producción de fitoplancton; al igual que el polvo mineral eólica, los procesos que afectan a la mineralogía y la caracterización de la ceniza puede promover la solubilización de la ceniza, y por lo tanto puede aumentar la cantidad de bandas de capas de apoyo a las aguas superficiales del océano; el conocimiento de estos controles en el mundo es aún muy limitado (Ayrís & Delmelle, 2011).

La relación del hombre con el ambiente es directa, pues hace parte de la tierra, vive, convive y toma provecho de esta con el planeta, es por ello que debe practicar el respeto a su propio hogar y comprender los límites y alcances de su entorno; el ser humano debe sensibilizarse y entender su entorno de tal manera que tome las mejores decisiones con discernimiento, para lograrlo, necesita de herramientas que le permitan predecir los riesgos de posibles fenómenos naturales

El hombre en la búsqueda de lugares adecuados para su hábitat, ha logrado establecerse en cercanías a los volcanes, esto lo ha llevado a convivir con sus características, por esta razón requiere de medios que le permitan tomar decisiones frente a las erupciones, los gases, etc.; como consecuencia de esto, diversos vulcanólogos del mundo estudian la geología, los fundamentos y las consecuencias del vulcanismo.

La ceniza volcánica representa una amenaza grave para las personas que viven cerca de los volcanes activos, ya que puede producir varios efectos graves para la vida, tales como: el colapso de los techos por la carga de ceniza, enfermedades respiratorias, la interrupción del tráfico aéreo, o daños a la agricultura; por lo tanto, la evaluación del riesgo volcánico es un asunto de vital importancia para la seguridad pública y la evaluación de las posibles consecuencias, hace que la mitigación necesite de modelos computacionales confiables, que permitan hacer procesos de predicción (Costa, Macedonio & Folch, 2006).

El proceso de modelación surge desde la construcción de una representación simbólica o gráfica de un problema de la vida real (Blum & Borromeo, 2009), que está causando inquietud por parte de algunos científicos que estudian la geología y los volcanes: es el fenómeno de dispersión de cenizas y

aerosoles volcánicos. En términos generales, la tendencia de estos investigadores es realizar procesos de modelación que de una u otra manera permiten realizar representaciones gráficas del fenómeno de estudio.

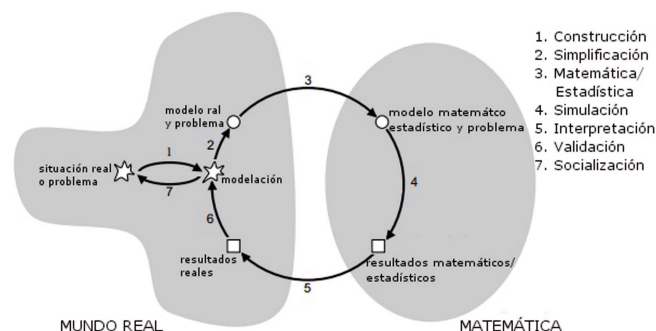


Figura 5. Paradigma de Ciclo de la Modelación.

Fuente: Blum y Borromeo (2009).

En la tercera versión del documento denominado Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras, Ingeominas (1997), se afirma que la evaluación fenómeno volcánico debe hacerse desde un modelo; el alcance de los peligros asociados a una eventual erupción, no se puede predecir de manera exacta. Por este motivo, cualquier modelo es una representación de la realidad que permite tener un soporte en la toma de decisiones de las poblaciones del área de influencia de un volcán, pero es tan sólo una herramienta, puesto que en últimas es el ser humano desde su sensibilidad el que debe evaluar desde su contexto cultural, social, económico, religioso y antropológico, su futuro frente a la convivencia con los volcanes.

La necesidad de las comunidades sobre el comportamiento de las cenizas en la atmósfera ha llevado a científicos del mundo a construir modelos, que basados en ecuaciones matemáticas, permiten hacer caracterizaciones del comportamiento de los vientos en la atmósfera, con herramientas como es el caso del *software* WRF y para los estudios de la dinámica de la ceniza volcánica con el *software* Fall3d.

El *software* WRF empezó a desarrollarse con colaboración de algunas organizaciones americanas y mundiales como: la División Nacional de Estudios para el Océano y Fenómenos Atmosféricos (NOAA), el Centro Nacional de Predicción de Desastres Naturales (NCEP), el Laboratorio de Estudios de Investigación de Desastres Naturales (FSL), el Departamento y Agencia de Defensa de Fenómenos Atmosféricos

(AFWA), el Laboratorio Naval de Investigación Oceánica (NRL), el Centro de Análisis y Predicción de Fenómenos y Riesgos de la Naturaleza (CAPS), El Centro Nacional de Estudios e Investigación Atmosférica (NCAR), la Universidad de Oklahoma (OU), la Federación y Administración de la Aviación (FAA), y la participación de muchos científicos del mundo (WRF modelo, 2012).

El modelo Fall3d, es un *software* diseñado por el Centro de Supercomputación de la Universidad de Barcelona de España, Fall3d se ha desarrollado desde hace más de ocho años con el objetivo de estudiar el comportamiento del transporte y la caída de cenizas volcánicas, también usado para el transporte de contaminantes en la atmósfera, con el fin de predecir el fenómeno de estudio; algunos de los centros de investigación que están realizando estudios sobre cenizas volcánicas mediante la aplicación de Fall3d son: el Instituto Nacional de Geología y Vulcanología de Italia, el Centro de Estudios Vulcanológicos de Buenos Aires, Ecuador, Instituto Geográfico Nacional de España, el Centro Nacional de Geo-Ciencias de Australia, El Centro Nacional de Estudios Aeroespaciales "CONAE" de Argentina, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, el Departamento Nacional de Administración de Fenómenos del Océano y Atmosféricos "NOAA" de los Estados Unidos, el centro de estudios atmosféricos de la universidad de Oklahoma de los Estados Unidos, la NASA, entre otros centros de investigación (Fall3d, 2012).

Un buen ejemplo de simulación numérica computacional es el caso del Volcán Concepción en la Isla de Ometepe, de Nicaragua, este es un volcán muy activo, con un rico registro histórico de erupciones explosivas; sus erupciones ponen en peligro las poblaciones de los alrededores, mientras que la navegación aérea se ve afectada por las nubes de ceniza. La evaluación de estos riesgos es importante para la planificación territorial y la adopción de medidas de mitigación; por ello se hacen cálculos probabilísticos del riesgo de este volcán, teniendo en cuenta tres escenarios diferentes basados en eventos eruptivos de referencia en el pasado; se usan las herramientas WRF acopladas con Fall3d; los resultados son útiles para identificar los impactos previstos para cada tipo de erupción y aspirar a mejorar la evaluación y gestión del riesgo en la región (Scaini, Folch & Navarro, 2012).



Figura 6. Volcán Concepción en la Isla de Ometepe, de Nicaragua, agosto de 2010.

Fuente: archivo fotográfico de Scaini, 2010.

2. Modelos de transporte y dispersión de cenizas

Estos tratan de predecir el depósito resultante de la ceniza en el suelo y la evolución o comportamiento de la nube de cenizas en su trayecto en la atmósfera, el *Volcanic Ash Advisory Centers* (VAAC) usa una combinación de estos modelos y realiza monitoreo remoto, (Scollo, Folch, Coltelli & Realmuto, 2004), con el objeto de validar las simulaciones realizadas de manera teórica por el *software* y los resultados reales de las erupciones de cenizas.

La modelización de cualquier fenómeno de dispersión de cenizas volcánicas incluye siempre un modelo de emisión, un modelo atmosférico y un modelo de transporte (Costa, Macedonio & Folch, 2006); un modelo de emisión o término fuente, que dependerá de cada caso si es una fuente difusa/puntual o una fuente transitoria/estacionaria (Neri, Aspinall, Cioni, Bertagnini, Baxter, et al., 2008); un modelo atmosférico o dinámica atmosférica, que se fundamentará en la resolución de las ecuaciones del fluido y la gran variedad de situaciones según la escala de trabajo, que puede ser global, regional o local (Granados, 2010); un modelo de transporte *sensu stricto*, el que describe el transporte del material y las ecuaciones particulares para cada caso (Gasso, Baldasano & Jime, 2005). Estos modelos son un conjunto de ecuaciones matemáticas que permiten caracterizar el fenómeno de estudio, las ecuaciones se trabajan desde aplicaciones de *software*, las soluciones se hacen por medio del procesamiento de computadores, puesto que los procesos son gigantescos y de tipo repetitivo, es por ello que se necesitan varios computadores con muchos procesadores para la ejecución de las simulaciones computacionales y la solución efectiva de las modelaciones.

Existen varios modelos de tipo matemático para estudiar los fenómenos volcánicos, por ejemplo, se destaca otro modelo propuesto por: Codina, Martõâ Folch, y Va, 1999, quienes han desarrollado un algoritmo para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizando un método de elementos finitos, tiene un amplio espectro de soluciones a problemas en la geología, la ingeniería y ciencias de la tierra; por ejemplo, se puede usar para modelar la dinámica de los flujos de magma poco profundas durante las erupciones volcánicas explosivas y en la caracterización de la dinámica de cenizas volcánicas; este modelo constituye un intento para caracterizar la evolución temporal de los parámetros físicos más relevantes durante una erupción.

Una aplicación de 2D realizada por Córdoba (2005), sirve para analizar la dinámica de flujo de piroclastos, ésta utiliza el modelo de la ecuación de Navier-Stokes, junto con la ecuación de difusión-convección y para caracterizar la sedimentación; este modelo se aplicó en una de las laderas del Volcán Galeras, de Colombia, para mostrar: 1) la evolución de la temperatura con el tiempo, 2) el cambio de presión dinámica, y 3) la concentración de partículas de la erupción del impacto con una barrera topográfica situada a más de 16 km de la fuente; en este trabajo se encuentra que las estructuras que están distantes, más lejos de 10 km podrían sobrevivir a una erupción, pero en todos los casos el flujo sigue siendo mortal para la vida; se muestra como un modelo dinámico de flujos piroclastos se puede implementar con el uso de computadores personales y con el uso de grandes y veloces computadores.



Figura 7. Volcán Puyehue, junio 12 de 2011.

Fuente: archivo fotográfico de Claudio Santana, 2011.

Los modelos de simulación computacional para el estudio de la dinámica de las cenizas y aerosoles volcánicos se distinguen por algunas características

propias, los podemos clasificar en: los de tipo Lagrangiano, también llamados trazadores; los de tipo Eulerianos, también en función de la escala donde se aplican, bien sea de tipo local o regional (Montero & Sani, 2007). Una de las tendencias utilizadas con el propósito de predecir la dispersión de cenizas volcánicas, es basar el estudio en enfoques estadísticos que proporcionan la carga de depósitos de *tephra* y concentración de ceniza; el modelo PUFF es de tipo Lagrangiano, él mediante un estudio de tipo paramétrico, permite analizar la influencia de cada parámetro de entrada en las salidas; para probarlo se realizaron dos simulaciones para los eventos sucedidos en los años 1998 y 2001: erupciones del Volcán Etna; y finalmente se procede a validarlo con ajuste de variables en los resultados de las concentraciones encontradas (Scollo, Prestifilippo, Coltelli, Peterson & Spata, 2011).

2.1 Los Modelos Lagrangianos nacen dentro de la comunidad meteorológica y son usados por la mayoría de los *Volcanic Ash Advisory Centers*, siguen la trayectoria de las partículas llamadas trazadores o PUFFS en un campo de vientos, dando y añadiendo una difusión aleatoria, las ventajas de estos modelos es que con pocas partículas puede estimar la posición de la nube de ceniza volcánica y gastan pocos recursos computacionales; se dice que son útiles durante una emergencia; la desventaja es que algunos dan sólo la posición de la nube y no su concentración; el cálculo de la concentración no es inmediato, ni simple, hay pocos estudios sobre el número de partículas necesarias para lograr convergencia, en teoría, no son óptimos para largas distancias o para escenarios muy difusivos, un ejemplo de este modelo es PUFF (Costa et al., 2006).

2.2 Los Modelos Eulerianos son basados en la ecuación de advección-difusión-sedimentación y de conservación de la masa (A Folch, Costa & Macedonio, 2009), la ecuación se resuelve para cada familia de partícula de ceniza (tamaño, densidad y forma); son ideales para calcular la concentración de una forma "natural", aunque la solución numérica "procesamiento" puede ser cara, dependiendo del dominio o área de estudio; añaden además, una difusión numérica que depende de la malla o dominio de trabajo; un ejemplo de este modelo es Fall 3D (Costa et al., 2006).

Se desataca que los modelos matemáticos desarrollados, bien sea WRF o Fall3d y el proceso de acoplación de estos, para fines de la caracterización de la dinámica de las cenizas y aerosoles volcánicos en la atmósfera, son muy buenas herramientas para los pronósticos de eventos volcánicos, aunque como lo afirma A. Folch, et al., (2012): “Los distintos modelos existentes se distinguen sobre todo por cómo tratan las entradas de datos de registros volcanológicos y las propiedades de la ceniza. La obtención de estos datos de entrada volcanológicos es el gran problema cuello de botella actual”. Además, se resalta que un trabajo que necesita ser mejorado es la validación o calibración de los resultados obtenidos en las experimentaciones de simulaciones teóricas computacionales, confrontadas con isopletas de concentraciones obtenidas de las erupciones reales o con imágenes.



Figura 8. Erupción Volcán Galeras, mayo 9 de 1989.
Fuente: archivos de Ingeominas, Pasto, 1989.

3. Descripción del Modelo de Transporte y Dispersión de Cenizas

Fall3d es un modelo que ha sido acoplado con WRF, para el transporte atmosférico de partículas, es un multipropósito, puesto que: 1) calcula el depósito de ceniza en el suelo, hace predicción de caída de cenizas; 2) calcula la concentración de ceniza en el aire, indica el seguimiento de nubes de ceniza. La acoplación de estos dos modelos se usa para la elaboración de mapas de riesgo y para sistemas de predicción temprana (A Folch et al., 2009).

Fall3d junto con WRF, son modelos multiescala, que pueden correr a escala desde sinópticas, aproximadamente hasta los 1000 km y hasta distancias locales o de unos pocos kilómetros. La definición de su dominio y resolución dependerá del tipo de partícula a simular y de la aplicación que se tenga. Las partículas gruesas caen a pocos kilómetros, las

muy finas a miles de kilómetros (Corradini, Merucci, & Folch, 2011).

El modelo se basa en la solución de la ecuación de Advección-Difusión-Sedimentación (ecuación ADS). Ésta no es más que la ecuación de conservación de la masa (Bonasia, Macedonio, Costa, Mele & Sulpizio, 2010):

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i + \underbrace{\nabla \cdot (U C_i)}_{\text{Advección}} - \underbrace{\nabla \cdot (V_{Si} C_i)}_{\text{Sedimentación}} = \underbrace{\nabla \cdot (K \cdot \nabla C_i)}_{\text{Difusión}} + \underbrace{S_i}_{\text{Fuente}}$$

Variación de masa en un punto

Los principales términos de la ecuación son: el de Advección, es decir, el transporte debido al “arrastre” del viento (u); el de Difusión, refleja la turbulencia atmosférica de sub-escala a través del “*eddydiffusivity*” tensor; el de Sedimentación, debido a la caída de las partículas por su propio peso, a partir de varios micrones de tamaño; el de fuente, que es la introducción de masa o columna eruptiva (A Folch, Cavazzoni, et al., 2008).

Los investigadores (Costa et al., 2006) en sus estudios muestran que la ecuación de Advección-Difusión-Sedimentación (ecuación de ADS) hay que resolverla para cada “tamaño de partícula”, en realidad, el tamaño no es lo único que determina la velocidad de caída sino también la forma y la densidad; una clase (o bin) se caracteriza por tres valores (ρ , d , Ψ), estos son: (ρ) Densidad de la partícula, (d) Diámetro de la partícula (o número φ) y (Ψ) Esfericidad de la partícula (factor de forma).

El término Advectivo, controla la advección debido al viento en las direcciones horizontales, introduce el acoplamiento con el modelo meteorológico WRF, estos pueden ser globales, meso-escalares o locales. Fall3d usa una estrategia *off-line*, es decir, se resuelve primero el modelo meteorológico aparte y después se interpolan los datos a la malla de Fall3d, es importante tener consistencia entre la resolución espacial del modelo de transporte y la resolución del modelo meteorológico. Para homogeneizar la entrada de datos meteorológicos, se usa una base (en formato net CDF) con los datos ya interpolados; ésta la genera un programa auxiliar llamado *SetDBs* (Granados, 2010).

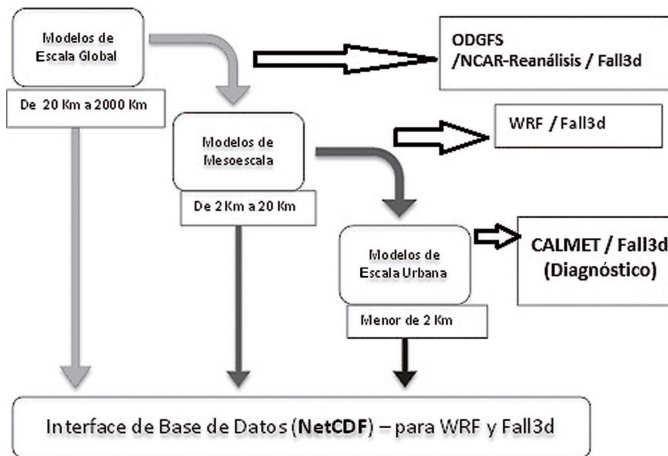


Figura 9. Características de Datos por Altura – WRF y Fall3d.
Fuente: autor del artículo.

Los autores: Folch, Costa, Durant y Macedonio, (2010), afirman que el término de Difusión, controla la “anchura” de la nube y, el depósito de ceniza resultante, depende también de la meteorología (turbulencia); tradicionalmente los valores se obtenían mediante un problema inverso, pero las condiciones meteorológicas no son siempre iguales y cambian durante todos los días del año, además también cambian capa a capa a medida que se sube en la atmósfera, sin embargo, indirectamente tienen en cuenta la difusión numérica; en el modelo se asume una difusión isotrópica en horizontal y diferencias verticales.

4. Caracterización de una erupción de cenizas volcánicas

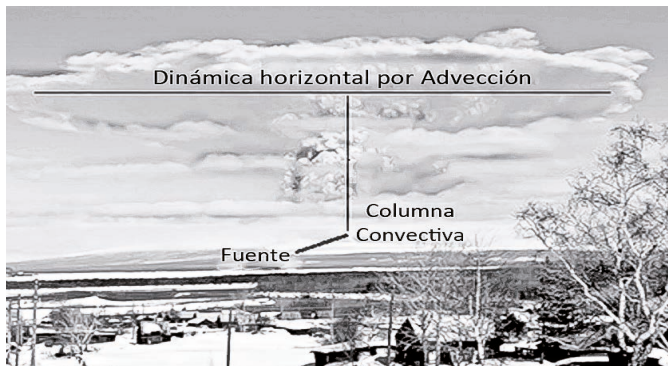


Figura 10. Erupciones de Cenizas.
Fuente: archivos fotográficos de Folch Arnau, 2010.

Folch y Felipe, (2005), afirman que la Difusión vertical, no es un parámetro crítico en ceniza volcánica (la mayoría del transporte ocurre por encima de la Capa Límite Planetaria, PBL), pero igual que el modelo Fall3d, tiene en cuenta este factor como dato de registro de entrada.

Suzuki, (1983), en su investigación propone que existen 2 posibilidades para modelar la difusión vertical: una opción es considerarla como constante ($K_v \approx 100-1000 \text{ m}^2/\text{s}$), se resalta que esta opción es muy utilizada en columnas muy fuertes o que pasan alturas de la tropósfera y pasan a alturas de la estratósfera; y la otra opción es resolver los siguientes modelos de Suzuki, para alturas que están dentro de la tropósfera:

Por debajo de la PBL:

$$K_v = k_u * z \left(1 + \frac{z}{h}\right) * \left(1 + 9.2 \frac{h * z}{L * h}\right)^{-1} \text{ para } \frac{h}{L} >= 0, \text{ Estable } \text{ ó}$$

$$K_v = k_u * z \left(1 + \frac{z}{h}\right) * \left(1 + 13 \frac{h * z}{L * h}\right)^{1/2} \text{ para } \frac{h}{L} < 0, \text{ Inestable}$$

Por encima de la PBL:

$$K_v = k_u * z \left(0.3 + \frac{1}{kz}\right)^{-1} * \left|\frac{\partial u z}{\partial z}\right| * \frac{1}{1 + 10 * Ri(1 + 8 Ri)}, \text{ Estable, } Ri > 0 \text{ ó}$$

$$K_v = k_u * z \left(0.3 + \frac{1}{kz}\right)^{-1} * \left|\frac{\partial u z}{\partial z}\right| * \sqrt{1 - 18 Ri}, \text{ Inestable, } Ri < 0 \text{ ó}$$

Folch y Felipe, (2005), en su publicación sobre dispersión de cenizas afirman que la Difusión horizontal, determina la “anchura” de la nube y el depósito de caída resultante; en su informe proponen las posibilidades para modelar la difusión horizontal, así: la primera opción es asumirla como constante, la segunda opción es calculada con el modelo CMAQ y la tercera opción (la más utilizada) es calculada como en el modelo RAMS (Costa et al., 2006), como se muestra a continuación:

$$K_h = 3 \max \left(0.075 \nabla^3; C^2 \nabla^2 \sqrt{\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right)^2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y}\right)^2 \right] \right)$$

donde $\nabla = \sqrt{\nabla_x + \nabla_y}$ y C es aproximadamente cercano a 0.2

Existe un problema con los dominios grandes de cobertura regional, puesto que los valores obtenidos son mucho más grandes que los típicamente obtenidos mediante problemas inversos ($\approx 5.000-10.000 \text{ m}^2/\text{s}$).

Los investigadores Carslaw y Jaeger, 2000, postulan el tratamiento del término de sedimentación, como parametrizaciones semi-empíricas para la velocidad terminal de caída, que típicamente se resuelven con el coeficiente de Drag y con el valor del número de Reynolds, así:

$$U_s = \sqrt{\frac{4dg(P_p - P_a)}{3Cd(Re)Pa}}$$

Donde Cd es el coeficiente de Drag
y Re es el número de Reynolds.

Por otro lado, Armienti, Macedonio y Pareschi, (1988) dicen que para partículas pequeñas (régimen laminar) se recupera la ley de Stokes, que la velocidad terminal depende de la altura, porque cambian las propiedades del aire (viscosidad, densidad) y que para gases (aerosoles) se asume velocidad terminal nula.

El investigador Carey (1996), propone las siguientes ecuaciones para el tratamiento de las partículas de ceniza de tipo esférico, basado en las afirmaciones de Armienti:

$$Cd = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 * Re^{0.687}) \quad , \text{para } Re \leq 10^3$$

$$Cd = 0.44, \text{ para } Re > 10^3$$

$$Cd = \frac{24}{Re * K1} (1 + 0.1118[Re(K1 * K2)]^{0.687}) + \frac{0.4305 * K2}{1 + \frac{3305}{Re * K1 * K2}}$$

$$Cd = K1 = 3/(1 + 2\psi)^{-0.5}$$

$$Cd = K2 = 10^{1.84148 * (-\text{Log}\psi)^{0.5743}}$$

$$d = \frac{24}{Re} \varphi^{-0.828} + 2 * \sqrt{1.07 - \varphi} \quad , \text{para } Re \leq 10^2$$

$$Cd = 1 - \frac{1 - Cd|Re = 10^2}{900} (10^2 - Re) \quad , \text{para } 10^3 \leq Re \leq 10^3$$

$$Cd = 1 \quad , \text{para } Re \geq 10^3$$

Suzuki, (1983), encontró que el término fuente para la columna eruptiva de las cenizas volcánicas, para calcular la "producción" de masa, debe trabajar la masa por unidad de tiempo (kg/s) que entra en el dominio, puesto que en una erupción, habrá que dar la distribución vertical de masa en la columna eruptiva, esto es, la masa por unidad de tiempo para cada clase de partícula y en cada nodo de la malla afectada. El modelo trabaja con las condiciones meteorológicas y admite dependencia temporal, por lo que se pueden simular erupciones con variaciones de altura de columna y/o fases de reposo, esta información se genera mediante la

aplicación denominada *SetSrc*, que admite tres tipos distintos de términos fuente: la primera es una opción de fuente puntual, en la segunda opción toda la masa se concentra en un solo punto a una altura H y la tercera opción, en la que la distribución de Suzuki, (1993), es vertical y dependiente de dos parámetros, H controla la posición del máximo Y y λ controla la distribución alrededor del máximo valor.

$$S(z) = S_0 \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right) e^{A \left(\frac{z}{H} - 1 \right)} \right]$$

5. Variables de Entrada en la Modelación de Cenizas

Los datos o registros necesarios para poder desarrollar simulaciones numéricas de tipo computacional con los modelos meteorológicos WRF y de cenizas Fall3d son:

1. Datos de Entrada Geográficos: Topografía y Localización del volcán.
2. Datos de Entrada Meteorológicos: Campo de Vientos y otras Variables como: Temperatura del Aire, Densidad, Humedad Relativa, entre otros.
3. Datos de Entrada Vulcanológicos:

- Granulometría: definición de cada clase y proporción de ellas (fracción de masa), distribución total de la ceniza, densidad de cada clase de partículas, factor de forma de cada clase (esfericidad).
- Término fuente: duración de la erupción (hora de inicio y fin), altura de la columna eruptiva, MFR y distribución vertical de masa.

5.1 Ejemplos de Aplicación

A continuación se observarán algunos ejemplos de simulación numérica computacional, fruto de la experimentación teórica de modelaciones, las que permiten hacer pronósticos y se han convertido en herramientas de gestión para la toma de decisiones en las zonas de afectación de fenómenos de la naturaleza; por un lado se presentan algunos trabajos de modelación meteorológica y por otro, la acoplación de modelos meteorológicos junto con modelos de dispersión de cenizas volcánicas:

El investigador Gomez, (2010), presenta la fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), la que está utilizando un modelo denominado RAMS, con el objeto de pronosticar

el comportamiento atmosférico; este sistema está siendo utilizado como un soporte para un sistema de alerta de ola de calor, un sistema de previsión de viento para la alerta y prevención de incendios, y para las tareas de previsión en general; sin embargo, es relativamente difícil de usar por los investigadores y meteorólogos, que no tienen habilidades con la informática, como son los modelos MM5 y WRF.

Los estudiosos Carvalho, Rocha, Gómez y Santos, (2012) presentan su investigación y pronóstico con el modelo WRF, que éste permite realizar la simulación del viento; su propuesta fue evaluada en diferentes opciones numéricas y físicas de una zona de Portugal, en un terreno complejo y caracterizado por su importante recurso de energía eólica; la red y el tiempo de integración de las simulaciones numéricas fueron las opciones probadas; el objetivo fue simular el viento cerca de la superficie; además, las influencias de la complejidad del terreno local y la resolución de dominio de simulación de los resultados del modelo, también fueron estudiados; los datos de entrada se tomaron de tres estaciones de medición de viento, se compararon los resultados del modelo, los histogramas de la velocidad del viento, los sucesos y las rosas de vientos, lo que permitió brindar información sobre las zonas potenciales para instalar centrales de energía eólica.

El “Informe de actividad de los volcanes nevado del Huila, Puracé y Sotará de julio de 2011”, del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) a través de la Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental, cuenta con una red de Observatorios Sismológicos y Vulcanológicos en el sector occidental del territorio colombiano, éstos se encargan de monitorear los volcanes activos de esta sección del país; por tal razón el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVS-Popayán), creado en 1993, realiza vigilancia continua a los volcanes Puracé y Sotará, localizados en el departamento del Cauca, y al Volcán Nevado del Huila, ubicado en límites de los departamentos del Cauca, Huila y Tolima, donde muestran pruebas piloto del trabajo de simulación de cenizas volcánicas para el Volcán Nevado del Huila.

El geólogo Brown, (2008), presenta en su trabajo un seguimiento al Volcán de San Agustín situado en el centro sur de Alaska, el que entró en erupción en enero de 2006 y generó vapor de agua, calor, cenizas

y aerosoles en la atmósfera; para determinar el impacto de estas cuatro influencias en el clima se desarrollaron 16 simulaciones, con el objeto de pronósticos del tiempo, para ello se usó WRF; en el desarrollo se encontró cambios significativos en la precipitación y temperatura de la superficie; el aumento de las partículas de aerosol conduce a un aumento de los números de nube de partículas con diámetros de partículas más pequeñas, efectivamente, impidiendo así el crecimiento de partículas de hielo y la disminución de la precipitación.



Figura 11. Erupción del Volcán *Puyehue*, junio 31 de 2011.

Fuente: archivo del Conae –Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Argentina.

Los investigadores Saucedo, Macías, Sheridan, Bursik y Komorowski, (2005), realizan una caracterización y descripción de las erupciones de ceniza del Volcán Colima de México tras las erupciones de los años 1988, 1991, 1994 y 1999; utilizaron un modelo numérico y computacional denominado Fall3d, con el que reconstruyen trayectorias, velocidades y alcances de los flujos piroclásticos del volcán y sus viscosidades. Los resultados del modelo proporcionan una base para la estimación de las áreas y niveles de riesgo que podrían estar asociados con una próxima erupción del volcán; en el trabajo se muestran tres (3) áreas de peligrosidad: alta, media y baja; se indica una simulación de una gran erupción del Volcán Colima sucedida en el año 1913, si en la actualidad llega a suceder una erupción de esa magnitud, afectaría a unos 15.000 habitantes de pequeños pueblos, ranchos y poblaciones ubicados a 15 km al sur del volcán; la simulación indica que las ciudades que se verían afectadas son: Yerbabuena, y Becerrera en el estado de Colima, Tonila, San Marcos, Cofradía y Juan Barraga Jalisco, en México.



Figura 12. Volcán Colima de México, agosto de 1999.
Fuente: archivos fotográficos de Saucedo, 2005.

Granados, (2010), en su investigación de maestría realiza un estudio para determinar las condiciones de frontera en el modelo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá, para ello empleo el modelo WRF y CHIMERE; las simulaciones se realizaron con datos correspondientes al periodo abarcado entre diciembre de 2007 y enero de 2008; éstas, tanto para el modelo meteorológico como el de calidad de aire, se hicieron en periodos consecutivos de simulación de 5 días. Se realizó una comparación cualitativa de los datos arrojados por el modelo meteorológico WRF; los resultados de las simulaciones obtenidas fueron comparados con los datos de medición de diferentes estaciones de monitoreo; se observó que todas mostraban la influencia de la pluma de contaminantes, asociados a la contaminación de ciudades y zonas industriales, mientras que en todas las simulaciones realizadas se mostraba el comportamiento típico de mesoescala con concentraciones inferiores a las reportadas en las estaciones de monitoreo, debido al efecto de la dilución; los archivos de salida del modelo CHIMERE sirven como archivos de entrada de condición de frontera para el modelo TAPOM, el que actualmente es utilizado como modelo de calidad de aire para Bogotá.



Figura 13. Polución en Asia, 2009.
Fuente: Mike Davis, El Mundo, 23/03/09.

El vulcanólogo Brown, (2011), muestra en sus estudios que la mayoría de las partículas de cenizas volcánicas tienen un diámetro inferior a las 63 micras, la agregación de partículas en un lote de volumen de la misma, reduce el tiempo de residencia en la atmósfera de ceniza fina, lo que resulta es un incremento proporcional de lluvia y de ceniza fina en áreas entre los 10 y 100 Km de radio del volcán y una reducción kilómetro a kilómetro en las concentraciones de ceniza; las partículas que comprenden agregados de ceniza se enlazan a través de enlaces (hidro-líquido y agua de hielo) y las fuerzas electrostáticas, la tasa de agregación de partículas se correlaciona con la disponibilidad de agua líquida en las nubes. Los parámetros del origen de la erupción, (incluyendo la distribución inicial de tamaño de partícula, erupción en masa, altura de columna de la erupción, el contenido de agua de las nubes y la temperatura), y el penacho de erupción de la temperatura gradiente, junto con los parámetros ambientales, determinan el tipo y la distribución espacio-temporal de los agregados. Los estudios de campo, experimentos de laboratorio e investigaciones de modelos, han aportado importantes conocimientos sobre el proceso de agregación de partículas; sin embargo, las nuevas observaciones integradas que combinan estudios de teledetección de nubes de ceniza con la medición de campo, toma de muestras y experimentos de laboratorio, son necesarias para llenar las brechas de conocimiento, en torno a la teoría de la formación de agregados de ceniza.



Figura 14. Clases de cenizas volcánicas de acuerdo a su tamaño.
Fuente: archivo fotográfico de Folch Arnau, 2010.

El geólogo Mastin, (2009), presenta su propuesta de modelos (VATDs), que describen la ubicación y el movimiento de las nubes de cenizas durante horas a días, a fin de definir los riesgos a las aeronaves y a las comunidades, a favor del viento; estos modelos

utilizan los parámetros de entrada llamados “parámetros de origen de las erupciones”, como: la altura de columna de la erupción, la masa de la erupción, la duración y la masa en fracciones, que puede permanecer en la nube durante muchas horas o días; las limitaciones de observación sobre el valor de estos parámetros con frecuencia no están disponibles en los primeros minutos u horas después de una erupción que se detecte; por otra parte, la altura de la pluma observada puede cambiar durante una erupción, lo que requiere la asignación rápida de los nuevos parámetros. Se ha experimentado con la técnica VATDs, con la que se puede hacer pruebas piloto con los datos necesarios para hacer modelaciones y simulaciones de dispersión de cenizas volcánicas; esta técnica ha permitido clasificar once tipos de erupción de 1500 volcanes del Holoceno; estos tipos de erupción y los parámetros asociados se pueden usar para el modelado de cenizas volcánicas de una erupción.

Un trabajo interesante es presentado por los autores Montero y Sanu, (2007), donde indican una buena aplicación de los modelos 3D para el transporte de contaminantes atmosféricos, teniendo en cuenta el acoplamiento de las ecuaciones de convección-difusión-reacción; el modelado se desarrolla por medio de una solución numérica, que se transforma mediante un sistema de coordenadas y la construcción de una malla, lo que proporciona esquemas de diferencias finitas con exactitud espacial alta; las ecuaciones de convección-difusión-reacción se resuelven con una orden de alta precisión, esquema de discretización de tiempo que se construye paso a paso siguiendo la técnica de Lax y Wendroff; esta tentativa de aplicación del modelo de experimento numérico fue desarrollado en La Palma, Islas Canarias, España.



Figura 15. Erupción en 1949 del Volcán San Juan, La Palma, Islas Canarias.

Fuente: archivo fotográfico de Miguel Bravo.

El químico y físico Zilitinkevich, (1998), propone un modelo de semejanza con la teoría, para el perfil vertical de los componentes de la velocidad del viento y, por el esfuerzo cortante en la superficie en forma estable, (estratificadas capas barotrópicas del límite planetario (PBL) o la Capa Límite Planetaria); de aquí se deriva la estabilidad estática impuesta en el borde exterior de esta capa y de inercia, presentándose oscilaciones dentro de la PBL; el trabajo propone una ecuación de múltiples variables para trabajar con el límite en la profundidad PBL y así se conduce a un estado estacionario; el modelo resultante está diseñado para su uso en el clima y a niveles de meso-escala, para aplicaciones de modelado de ingeniería y campos de viento.

La pluma de cenizas del Volcán *Eyjafjallajökull* que cubrió Europa en abril y mayo de 2010, en particular ha despertado el interés de investigadores de la atmósfera; emisiones, transporte y deposición de las cenizas volcánicas; estos eventos son simulados con el modelo de química y transporte denominado COSMO y MUSCAT; los resultados de la simulación se comparan con las imágenes de la Nasa del Espectrómetro de Imágenes *Multiangle Imaging Spectro Radiometer*, (MISR); esta configuración permite establecer varios niveles de emisiones que están por debajo de las alturas máximas reportadas por el Centro de Asesoría de Ceniza Volcánica (VAAC) de Londres (Heinold et al., 2012).

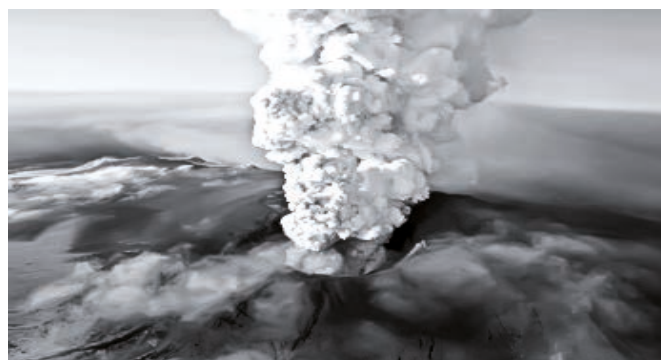


Figura 16. Volcán Islander *Eyjafjallajökull*, mayo 12 de 2010.
Fuente: VAAC, 2010.

El vulcanólogo Scollo, (2011), estudia las erupciones del monte Etna de los años 1998, 2001, 2002; la modelación que utiliza es de enfoque estadístico y le proporciona la carga de depósitos de *tephra* y concentración de ceniza con el modelo PUFF, éste es un modelo Lagrangiano ampliamente utilizado para predecir la dispersión de cenizas volcánicas durante

entradas, con el fin de cuantificar una variación de un parámetro de entrada dado (es decir, una incertidumbre en el modelo de entrada) y encontrar lo que afecta a los resultados del modelo. La investigación considera: los efectos topográficos, la descripción diferente para la columna de la erupción, la influencia de la altura de la columna, los ajustes diferentes para velocidades terminales de partículas, el efecto de la forma de las partículas y, por último, la variación del tamaño de grano entre modos de transporte; las diferencias del modelo se cuantifican por medio de una distancia normalizada, que indica lo cerca o lejos de los resultados en dos simulaciones diferentes; también se compara las predicciones de los diferentes modelos, para determinar en qué circunstancias es más adecuado usar un modelo determinado.

Los resultados del estudio muestran que la producción paramétrica de los modelos pueden ser muy sensibles a las incertidumbres y suposiciones sobre los parámetros de entrada, tales como la velocidad de la erupción sobre todo en: masa, altura de la columna, distribución de la masa a lo largo de la columna, mayor tamaño de grano de distribución; esto pone de relieve que, para buenos pronósticos se debe mejorar la descripción de estos parámetros y de algunos procesos físicos importantes, como la dinámica de la columna de fragmentación y la erupción.

La elección del modelo depende principalmente de la clase de aplicación, tales como la necesidad de simular la evolución de las nubes volcánicas en la atmósfera; finalmente, el uso tanto de un modelo semianalítico como Hazmap y un modelo teórico completamente computacional como lo es Fall3d, mostraron que para los datos de campo y la dispersión de los parámetros de mejor ajuste, son similares los dos modelos, que además, son consistentes con los valores obtenidos utilizando técnicas independientes.

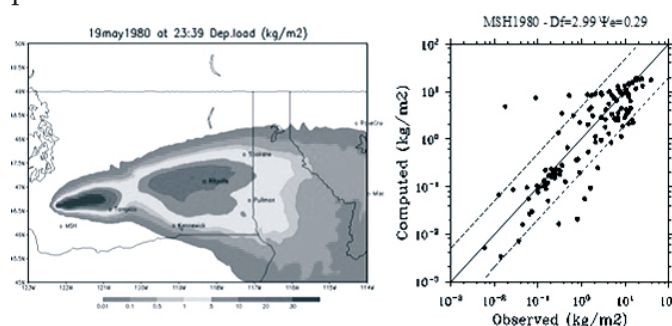


Figura 18. Simulación de la erupción de cenizas del MAH, año 180. Fuente: archivos fotográficos de Folch Arnau.

5.2 La simulación como herramienta de toma de decisiones

Estas herramientas de modelación permiten: hacer mapas de riesgo, válidos a cualquier distancia y para cualquier tamaño de partícula; calcular la probabilidad de caída a grandes distancias; posibilitar el cálculo de la probabilidad de interrupción de un cierto nivel de vuelo; también, calcular mapas de isocronas (tiempos de llegada de ceniza).

Peter, Baxter, Neri y Blong, (2008), construyeron una herramienta de modelación con WRF y Fall3d a la que la denominaron *Exploris*, este es un acrónimo del proyecto financiado por la Unión Europea (UE) y que quiere decir "Erupción explosiva de riesgos y apoyo a las decisiones de la UE para las poblaciones amenazadas por los volcanes". Es el primer proyecto multidisciplinario para desarrollar métodos cuantitativos, para la realización de evaluaciones de riesgo y el desarrollo de la planificación basada en la evidencia del manejo de desastres en erupciones explosivas de volcanes; *Exploris* es una herramienta en desarrollo, sus resultados deben ser considerados como directamente aplicables a la gestión de las crisis volcánicas.

Folch Arnau y Sulpizio, (2010), del Instituto de Vulcanología y Geología Vesubiano de Italia, realizó un estudio sobre el impacto de la lluvia de cenizas volcánicas después de una erupción del Vesubio, la que representa una grave amenaza para la zona altamente urbanizada que existe alrededor. A fin de evaluar el riesgo relativo se consideraron tres diferentes escenarios posibles: pliniana, subpliniana, y violentas erupciones estrombolianas. Las erupciones de referencia para cada escenario son similares a la del año 79 (Pompeya), el AD 1631 (o 472 DC) y los 1944 DC; los depósitos de caída para los dos primeros escenarios se modelan: mediante Hazmap, un modelo basado en una solución semianalítica de 2D que trabaja con las ecuaciones de advección-difusión-sedimentación; por el contrario, después de una lluvia violenta (caso estromboliano), se modelan por medio de Fall3d, un modelo numérico computacional basado en la solución en 3D de advección-difusión-sedimentación y se afirma que esta ecuación es válida también dentro de la capa límite atmosférica. Las entradas para los modelos son: la masa total de la dispersión de ceniza, las características como altura de la columna, tamaño de grano, distribución de cenizas y un conjunto

estadístico de los perfiles de viento obtenidos por los NCEP / NCAR o WRF; finalmente Macedonio presenta mapas de peligrosidad de acuerdo a las simulaciones realizadas por el modelo de pronóstico.

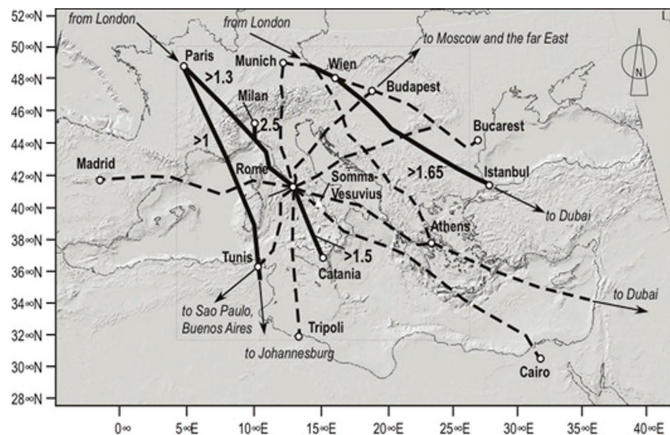


Figura 19. Volcán Vesuvio, 2005.

Fuente: Sulpizio, 2010.

El grupo de científicos Costantini, Pioli, Bonadonna, Clavero y Longchamp, (2011), realizaron un trabajo de simulación computacional en Villarrica (Chile), uno de los volcanes más activos de América del Sur; y se puede resaltar que en uno de sus grandes depósitos ha dispersado ampliamente material piroclástico, en un área de 250 km²; los datos estratigráficos indican que la erupción tuvo una duración relativamente corta y se desarrolló a partir de una fase de apertura, la dispersión de cenizas, lapilli clastos, lapilli acreción, bloques y bombas se dio según las condiciones atmosféricas del momento de erupción; lo curioso es que las comunidades han desarrollado su cultura y hábitat alrededor del volcán y subsisten principalmente en el turismo y la silvicultura. Por esta razón, es importante una mejor comprensión de la dinámica y evolución de una erupción de cenizas; es necesario identificar los escenarios de riesgos potenciales y en última instancia, para la mitigación de los riesgos de esta zona poblada al sur de Chile; con la ayuda de las herramientas mencionadas, el grupo presentó un modelo de predicción para la toma de decisiones.

Las organizaciones gubernamentales y privadas del Ecuador conocidas, (Corpaire, Ante, Episodios, Pichincha, & Plan, 2009), incorporaron en el plan de contingencia de la ciudad de Quito, un sistema de simulaciones de erupciones volcánicas; una vez instalado e implementado el sistema de pronóstico de dinámica de cenizas con un modelo acoplado en-

tre WRF y Fall3d; para verificar el funcionamiento realizan pruebas piloto de simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza volcánica en Quito, principalmente por la erupción del Volcán Reventador en noviembre de 2002.

Los sistemas de modelación y simulación con herramientas WRF y Fall3d, tienen la posibilidad de generar mapas de isocronas: con lo que, si hay alteración del aeropuerto, por lo general se produce en menos de 24 horas (h).

Los ingenieros Narváez y Pérez, (2006), han realizado un proceso de estudio sobre la simulación de la calidad del aire, con base en el uso de modelos de transporte químico Eulerianos; estas herramientas proporcionan: mapas de la calidad del aire con alta resolución espacial y temporal, permiten estimar el aporte contaminante de cada fuente de emisión, ayudan a evaluar los efectos sobre los niveles de contaminación ante potenciales cambios de los escenarios de emisión y, constituyen el elemento central para los sistemas de pronóstico de la contaminación del aire. Corpoaire, desarrolló un modelo de predicción de la calidad del aire de la ciudad de Quito, utilizando *Weather Research and Forecasting Model with Chemistry* (WRF-Chem), uno de los más recientes modelos numéricos que simulan al mismo tiempo la meteorología y los procesos de transporte químico; el modelo de predicción prioriza al ozono y el material particulado, estos son contaminantes que actualmente contribuyen en mayor grado al deterioro de la calidad del aire de Quito.

Los investigadores Carazzo y Jellinek, 2012, presentan una serie de experimentos de laboratorio que producen turbulencias en los aviones, fruto de las partículas de ceniza volcánica; las pruebas reproducen muchos de los principales regímenes dinámicos observados durante la formación de una columna volcánica. Se pone de relieve la dinámica de la nube de cenizas volcánicas; las predicciones teóricas de dinámica de cenizas de un chorro turbulento están en acuerdo con las observaciones experimentales. En los registros de las erupciones naturales, se observa que la dinámica de los PBL desempeñan un papel importante en la sedimentación de partículas y depende de la distribución del tamaño de grano dentro de la nube y en la altura de la erupción de la columna, y la dinámica del mismo fenómeno; esta dinámica es evidente en las observaciones y experimentaciones de numerosas erupciones y se infie-

re de los depósitos de las erupciones históricas y prehistóricas. Esta información es muy importante para analizar las consecuencias de estos fenómenos en problemas tales como los peligros volcánicos a los seres humanos y el cambio climático, por lo tanto, será muy importante en la evaluación de futuras erupciones.

5.3. Ejemplos de validación y calibración

Los resultados obtenidos por los experimentos teóricos, fruto de las simulaciones de los modelos computacionales, se deben validar o calibrar, para que tener parámetros de comparación y confiabilidad con los registros reales de un fenómeno de dispersión de cenizas y aerosoles de volcanes, aquí se presentan algunos trabajos de validación a manera de experiencia sobre las necesidades de indagar y explorar el campo de la validación y calibración.

Los elementos que tiene el investigador para sus validaciones o calibraciones, una vez finalizada la erupción, son imágenes de satélites e isópacas de concentración de ceniza en el suelo; los métodos son sistemas de correlación de técnicas matemáticas, estadísticas y gráficas por medio de los SIG.

Desde el centro de supercomputación de la Universidad de Barcelona (Folch et al., 2012), se presentó el impacto de las nubes de ceniza del Volcán *Eyjafjallajökull*, generado durante abril y mayo de 2010, estas llegaron a Europa causando una interrupción sin precedentes en el espacio aéreo; autoridades de aviación civil prohibieron todas las operaciones de vuelo debido a la amenaza planteada por la ceniza volcánica a los aviones. En este nuevo contexto de validación, el modelo cuantitativo y la evaluación de la precisión de los actuales estados de arte de los modelos de simulación teóricos, es de suma importancia, validar el modelo de dispersión de cenizas Fall3d mediante la comparación de los resultados del modelo con el suelo y las medidas basadas en el avión, obtenidas durante el período inicial.

Los resultados del modelo se comparan con los remotos, basados en tierra e in situ a base de la aeronave, incluyendo las mediciones de *lidarceilometers* del Servicio Meteorológico Alemán, líder en aerosoles y fotómetros solares de European Aerosol Lidar Network, red de líderes avanzados europeos (EARLINET) y las redes *Aerosol Robotic Network*, liderada por la NASA (AERONET) y las misiones de vuelo

de la alemana DLR *aircraft*; los resultados ayudan a comprender la verificación, además limitan la exactitud y fiabilidad de los modelos de transporte de cenizas, que es de enorme relevancia para el diseño de futuras estrategias de mitigación, operadas en los Centros de Asesoramiento de Cenizas Volcánicas.

La teleobservación por satélite de datos, presenta una importante herramienta para mapeo y análisis de la ceniza volcánica en el aire, tanto en el espacio como en el tiempo; se realizó el experimento de comparar imágenes de satélite de erupciones de ceniza del Volcán Monte Redoubt de los meses de marzo y abril de 2009 con 19 eventos detectados; una vez obtenidas las imágenes, se realiza las simulaciones con PUFF combinado con WRF-Chem, para validar las simulaciones teóricas, WRF-Chem muestra una excelente evaluación de las características de la dinámica de las cenizas en la atmósfera, en comparación con los datos obtenidos por satélite (Steensen, Stuefer, Webley, Grell, & Freitas, 2012).

El análisis numérico en simulaciones computacionales con WRF y Fall3d de erupciones características del Volcán Chichon de Chiapas, México, y su respectiva validación con datos de imágenes de satélite y con isopacas de concentraciones en tierra (Bonasia et al., 2012), erupción de cenizas del Monte Etna, julio 22 de 2001.

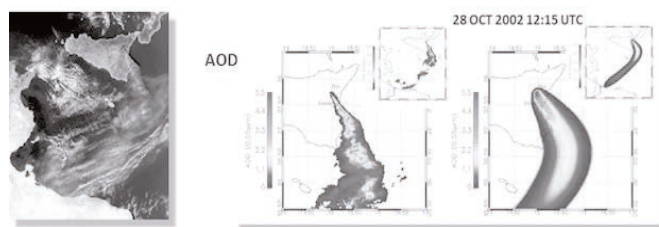


Figura 20. Cenizas Volcánicas del Monte Etna 28 de octubre de 2002. Fuente: archivo fotografías de Folch Arnau, 2010.

Corradini, (2011), realizó una comparación entre imágenes del satélite Modis y los resultados de la modelación, la imágenes de resolución moderada Spectro-radiómetro (MODIS) es un satélite que opera instrumentos multispectrales de lo visible a rango espectral infrarroja y térmica; Fall3d es un modelo 3D en función del modelo Euleriano para el transporte y la deposición de las partículas volcánicas; el trabajo compara cuantitativamente los resultados de la simulación de Fall3d de nubes volcánicas y la profundidad óptica recuperada por el MODIS.

La investigación se hizo con tres imágenes MODIS del 28, 29 y 30 de octubre de 2002 de erupciones volcánicas del Monte Etna; se muestra cierta correlación entre los resultados de la simulación hechos con Fall3d y las imágenes generadas por el satélite MODIS, inclusive se observa más detalles en los datos de la simulación, que en los de las gráficas generadas por MODIS; la dirección de la nube volcánica mostrada con Fall3d no coincide con las imágenes generadas por el satélite MODIS para las fechas del 29 y 30 de octubre de 2002, de esto se infiere, que la diferencia se da porque la imagen del satélite es real y los campos viento se modelan de manera matemática o simulada; los mapas MODIS muestran regiones de concentración de masa mucho mayores que los resultados de Fall3D. Se concluye que es un campo poco estudiado la calibración o validación de los resultados obtenidos con las simulaciones de Fall3d y, los registros reales obtenidos por imágenes de satélites.

Las características del sistema UIS son: consistencia en la “forma de la nube”, peores resultados en la localización de la nube, en los satélites Terra y Aqua de la NASA, 36 bandas espectrales del VIS to TIR, resolución espacial de 1 km a 250 m, una sola cámara en el nadir, detección de ceniza por substracción de bandas.

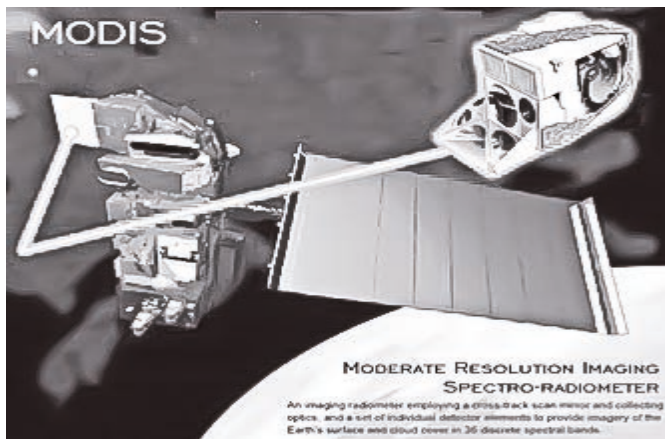


Figura 21. Satélite MODIS.

Fuente: archivos fotográficos de Folch Arnau, 2010.

Lo que se tiene en contra es que no da información sobre altura de la columna, sensible por debajo de PM_{10} , no es válido cerca de la fuente, sólo ve una porción de la nube.

Lo que se tiene a favor: *Cloud massretrieval*, *Aerosol Optica lDepth* (AOD), Tamaño de partícula.

FALL3D/MODIS cuantitativos de comparación.

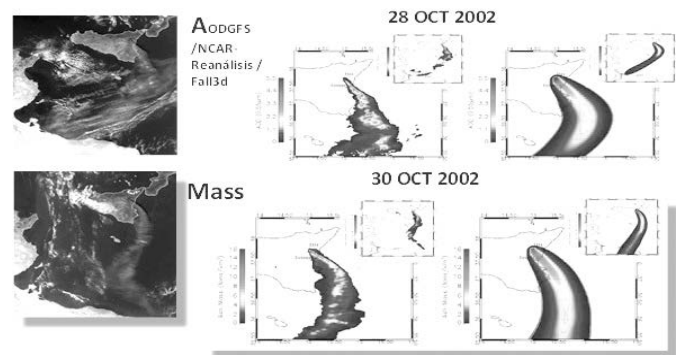


Figura 22. Cenizas Volcánicas del Monte Etna 28 de octubre de 2002. Fuente: archivos fotográficos de Folch Arnau, 2002.

CONCLUSIONES

En la Actualidad es importante para las comunidades contar con sistemas de pronóstico, que le permitan a la población tomar decisiones en caso de un suceso de erupción volcánica. Los modelos o ecuaciones matemáticas, como es el caso de la Advección-Difusión-Sedimentación (ecuación ADS), son herramientas de mucha utilidad en los experimentos teóricos y de simulación de dispersión de partículas en la atmósfera. Las herramientas computacionales como WRF o PUFFS, tienen gran valor por la utilidad que ellas representan, para la simulación de las condiciones de vientos en la atmósfera.

El modelo Fall3d, permite conectarse en las bases de datos e importar registros de campos de vientos, bien sea de sistemas como WRF o como PUFFS. Su acoplación, bajo sistemas de software libre con plataformas libres, debe implementarse en estaciones de trabajo con varios procesadores, para obtener resultados de procesamiento en términos aceptables de tiempo.

El fenómeno de la dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, debe ser estudiado, seguido y monitoreado con atención por parte de los seres humanos que viven en zonas cercanas o de afectación de los volcanes.

El proceso de validación o calibración de resultados de simulaciones, frente a datos reales presentados en mapas de isópacas de dispersión y concentración de cenizas en el piso o las mismas imágenes de satélite, son un campo poco explorado y constituyen un espacio libre para hacer investigación. El ser humano en lo posible debe planificar su hábitat fuera de las zonas de amenaza volcánica, para proteger y preservar la conservación de la especie humana.

La región Latinoamericana, es un gran espacio de estudio; su cordillera de los Andes, presenta muchas formaciones volcánicas, varias están activas y deben ser monitoreadas con atención para prevenir posibles pérdidas humanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armienti, P., Macedonio, G., Pareschi, M. (1988) *A numerical model for simulation of tephra transport and deposition: applications to May 18, 1980, Mount St Helens Eruption*, J. Geophys. Res. 93(B6): 6463-6476, p. 12 - 30
- Ayris, P. & Delmelle, P. (2011) Volcanic and atmospheric controls on ash iron solubility: A review. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, (August 2008). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.pce.2011.04.013
- Baxter, P., Neri, A. & Blong, R. (2008) Evaluating explosive eruption risk at European volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3), v-ix. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.11.012
- Baxter, P., Aspinall, W., Neri, A., Zuccaro, G., Spence, R., Cioni, R., & Woo, G. (2008) Emergency planning and mitigation at Vesuvius: A new evidence-based approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3), 454-473. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.08.015
- Blum, W. & Borromeo Ferri, R. (2009) Mathematical Modelling: Can It Be Taught And Learnt? *Journal of Mathematical Modelling and Application*, 1(1), 45-58.
- Bonasia, R., Costa, A., Folch, A., Macedonio, G., & Capra, L. (2012) Numerical simulation of tephra transport and deposition of the 1982, El Chichón eruption and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 231-232, 39-49. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.04.006
- Bonasia, R., Macedonio, G., Costa, A., Mele, D. & Sulpizio, R. (2010) Numerical inversion and analysis of tephra fallout deposits from the 472 AD sub-Plinian eruption at Vesuvius (Italy) through a new best-fit procedure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3-4), 238-246. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.11.009
- Boff, L. (2008) *La opción - Tierra, La solución para la tierra no cae del cielo*. Santander, Brasil: Editorial Sal Terrae, Impreso en España, ISBN:978-84-293-1762-6, Dep. Legal: BI-672-08, Impresión y encuadernación Grafo, S.A. - Basuari, Vizcaya. p 26 - 27.
- Brown, R., Bonadonna, C. & Durant, A. (2011) A review of volcanic ash aggregation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 14. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.pce.2011.11.001
- Carazzo, G. & Jellinek, A. (2012) A new view of the dynamics, stability and longevity of volcanic clouds. *Earth and Planetary Science Letters*, 39-51. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.epsl.2012.01.025
- Carey, S. (1996) *Modeling of the tephra fallout from explosive eruptions, Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 440-470.
- Carlsaw, H. & Jeager, J.C. (2000) *Conduction of Heat in solids*, Oxford University, Press, London, 43-45.
- Cordoba, G. (2005) A numerical model for the dynamics of pyroclastic flows at Galeras Volcano Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 59-71. doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.06.015
- Codina, R., Martõa, J., Folch, A. & Va, M. (1999) A fractional-step nite-element method for the Navier ± Stokes equations applied to magma-chamber withdrawal. *Earth*, 25, 263-275.
- Corpaire, A., Ante, C., Episodios, E., Pichincha, G., & Plan, E. (2009) Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en Quito debido a la erupción del Volcán Reventador durante el 3 de noviembre de 2002. *Atmospheric Research*.
- Corradini, S., Merucci, L. & Folch, A. (2011) Volcanic Ash Cloud Properties: Comparison Between MODIS Satellite Retrievals and FALL3D Transport Model. *October*, 8(2), 248-252.
- Costa, A., Macedonio, G. & Folch, A. (2006) A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4), 634-647. doi:10.1016/j.epsl.2005.11.019
- Costantini, L., Pioli, L., Bonadonna, C., Clavero, J. & Longchamp, C. (2011) A Late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: The Chaimilla deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200(3-4), 143-158. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.12.010
- Daniele, P., Lirer, L., Petrosino, P., Spinelli, N. & Peterson, R. (2009) Computers & Geosciences Applications of the PUFF model to forecasts of volcanic clouds dispersal from Etna and Vesuvio. *Computers and Geosciences*, 35(5), 1035-1049. Elsevier. doi:10.1016/j.cageo.2008.06.002
- Dowd, C., Varghese, S., Martin, D., Flanagan, R., Mckinstry, A., Ceburnis, D., Ovadnevaite, J., et al. (2012) The Eyjafjallajökull ash plume e Part 2: Simulating ash cloud dispersion with REMOTE. *Atmospheric Environment*, 48, 143-151. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.10.037
- Durant, A., Villarosa, G., Rose, W., Delmelle, P., Prata, A. & Viramonte, J. (2011) Long-range volcanic ash transport and fallout during the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.pce.2011.09.004

- Fall3d, (2012). Centro de Supercomputación de la Universidad de Barcelona, Modelo Fall3D, Recuperado el 6 de febrero de 2012, de <http://www.bsc.es/projects/earthscience/fall3d/> Completar la información del autor.
- Folch A., Costa, A., Durant, G., Macedonio, G. (2010) A Model for Wet Aggregation of Ash Particles in Volcanic Plumes and Clouds: II. Model Application, *J. Geophys. Res.*, in press. 310 - 345.
- Folch, A., Cavazzoni, C., Costa, A. & Macedonio, G. (2008) An automatic procedure to forecast tephra fallout. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 769-779. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.046
- Folch, A, Costa, A. & Basart, S. (2012) Validation of the Fall3d ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmospheric Environment*, 48, 165-183. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.072
- Folch, A, Costa, A. & Macedonio, G. (2009) Computers & Geosciences Fall3d: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers & Geosciences*, 35, 1334-1342. doi:10.1016/j.cageo.2008.08.008
- Folch, A. & Felipe, A. (2005) A coupled model for dispersal of tephra during sustained explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145, 310 - 340.
- Folch, A, Jorba, O., & Viramonte, J. (2008) Volcanic ash forecast – application to the May 2008 Chait ´ en eruption. *Earth*, 927-940.
- Folch, A., Neri, A., Macedonio, G. & Mart, J. (2000) Pressure evolution during explosive caldera-forming eruptions. *Science*, 175, 275-287.
- Folch A., R. Sulpizio (2010). Long range volcanic ash hazard and civil aviation. Application to Somma-Vesuvius (Italy), and consequences over the Central Mediterranean Area. *Bulletin of Volcanology*, 72(9), 1039-1059.
- Granados, J. (2010) *Determinación de las condiciones de frontera para el modelo de calidad de aire de Bogotá empleando WRF chimere*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gasso, S., Baldasano, M. & Jime, P. (2005) Modeling the ozone weekend effect in very complex terrains: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 39(10), 429-444. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.065
- Heinold, B., Tegen, I., Wolke, R., Ansmann, A., Mattis, I., Mini-kin, A., Schumann, U., et al. (2012) Simulations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash dispersal over Europe using COSMO–MUSCAT. *Atmospheric Environment*, 48, 195-204. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.021
- Igor Gomez, M. (2010) Computers & Geosciences Design and development of a Java-based graphical user interface to monitor / control a meteorological real-time forecasting system. *Computers & Geosciences*, 36, 1345-1354. doi:10.1016/j.cageo.2010.05.005
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1997) Mapa de amenaza volcánico del Galeras (3 ed.). Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería. pp. 31-36.
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. & Matthias, V. (2012) Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April–May 2010. *Atmospheric Environment*, 48, 1-8. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.03.054
- Macedonio, G., Costa, A. & Folch, A. (2008) Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3), 366-377. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.08.014
- Montero, G. & Sanı, N. (2007) A finite difference model for air pollution simulation. *Advances in Engineering Software*, 38, 358-365. doi:10.1016/j.advengsoft.2006.09.013
- Narváez, R. & Pérez, C. (2006) Estrategia para el desarrollo de un modelo de predicción de la calidad del aire de Quito y resultados preliminares de la fase de diagnóstico. *Acta Nova*, 3(2), 238-256. Quito, Ecuador.
- Neri, A., Aspinall, W., Cioni, R., Bertagnini, A., Baxter, P., Zucaro, G., Andronico, D., et al. (2008) Developing an Event Tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3), 397-415. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.05.014
- Sparks, R., Woods, A., Bursik, M., Carey S., Sigurdsson, H., Glaze, L. & Gilbert, J. (1997) *Volcanic Plumes*. England: John Wiley & Sons Ltd. ISBN; 0-471-93901-3, QE527.7.V65, 551.2'3-DC21, 96-39034CIP,
- Saucedo, R., Macías, J., Sheridan, M., Bursik, M. & Komorowski, J. (2005) Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(1-2), 103-115. doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.06.019
- Scaini, C., Folch, A. & Navarro, M. (2012) Tephra hazard assessment at Concepción Volcano, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 219-220, 41-51. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.01.007
- Scollo, S., Folch, A., Coltelli, M. & Realmuto, V. (2004) 3D volcanic aerosol dispersal: a comparison between MISR data and numerical simulations. *Jet Propulsion*, 3(1), 41.
- Scollo, S., Folch, A. & Costa, A. (2008) A parametric and comparative study of different tephra fallout models. *Volcanology and Geothermal Research*, 176, 199-211. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.04.002
- Scollo, S., Prestifilippo, M., Coltelli, M., Peterson, R. & Spata, G. (2011) A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200(3-4), 129-142. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.12.004

- Steensen, T., Stuefer, M., Webley, P., Grell, G. & Freitas, S. (2012) Qualitative comparison of Mount Redoubt 2009 volcanic clouds using the PUFF and WRF-Chem dispersion models and satellite remote sensing data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.02.018
- Suzuki, T. (1983) A theoretical model for dispersion of tephra. En: D. Shimozuru y I. Yokoyama (Eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics* (89-100). Terra Scientific Publishing Company, Tokyo,
- Witham, C., Webster, H., Hort, M., Jones, A. & Thomson, D. (2012) Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions. *Atmospheric Environment*, 48, 219-229. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.073
- Weather Research and Forecasting, Modelo de Simulación Numérico atmosférico. (s.f.) Recuperado el 6 de febrero de 2012, de <http://www.wrfmodel.org/index.php>
- Zilitinkevich, S. (1998) A similarity-theory model for wind profile and resistance law in stably stratified planetary boundary layers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, 1485-218. doi:10.1016/S0167-6105(98)00018-X