



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

SISTEMA DE DESPLIEGUE GRÁFICO WEB DE LA
MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE CENIZAS DEL
VOLCÁN POPOCATEPETL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN COMPUTACIÓN

P R E S E N T A:

OMAR LUNA CORTES



DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO
2015

CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, EDO. DE MEXICO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Capítulo 1 Introducción	2
Capitulo 2 Antecedentes	5
2.1 Volcán Popocatépetl	5
2.2 Modelo Fall3D	11
2.3 Modelo WRF	17
Capitulo 3 Objetivo	19
Capitulo 4 Descripción del sistema de cálculo.	20
4.1 Diagrama de Flujo.....	20
4.2 Fall3D.....	21
4.3 Grads	27
Capitulo 5 Descripción interfaz gráfica	29
Capitulo 6 Resultados y Conclusiones	36
6.1 Resultados	36
6.2 Conclusiones.....	42
Bibliografía y referencias	43

Introducción

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de un sistema de despliegue en ambiente web, de imágenes de pronóstico de dispersión de ceniza volcánica en el caso de que ocurra una erupción más del volcán Popocatépetl.

La Ciudad de México está situada en una zona con alta actividad sísmica y volcánica, aunado a esto, está la cercanía con el volcán Popocatépetl —ubicado a tan solo 70 Km de distancia—; éste representa un gran riesgo para las actividades normales de las personas que habitan la ciudad. Mediante el pronóstico de dispersión de ceniza se pretende reducir el impacto que este fenómeno produciría y así poder orientar a la población sobre las zonas que se verían más afectadas, no sólo de la ciudad de México sino también de las áreas cercanas al volcán y que igualmente pueden verse afectadas en caso de una erupción.

Este proyecto surgió debido a la nula existencia de algún medio para conocer el impacto que tendría el despliegue o dispersión de la ceniza en caso de erupción. La ceniza, por más simple que parezca, tiene el potencial de afectar el desarrollo normal de muchas actividades urbanas y rurales de igual manera. Incluso, el caso del volcán Eyjafjallajökull¹ en Islandia durante el mes de abril de 2010, sería un ejemplo muy reciente: la ceniza afectó a la mayoría de la Unión Europea debido a la magnitud de la erupción explosiva de dicho volcán.

¹<http://topics.nytimes.com/top/news/international/countriesandterritories/iceland/eyjafjallajokull/index.html>

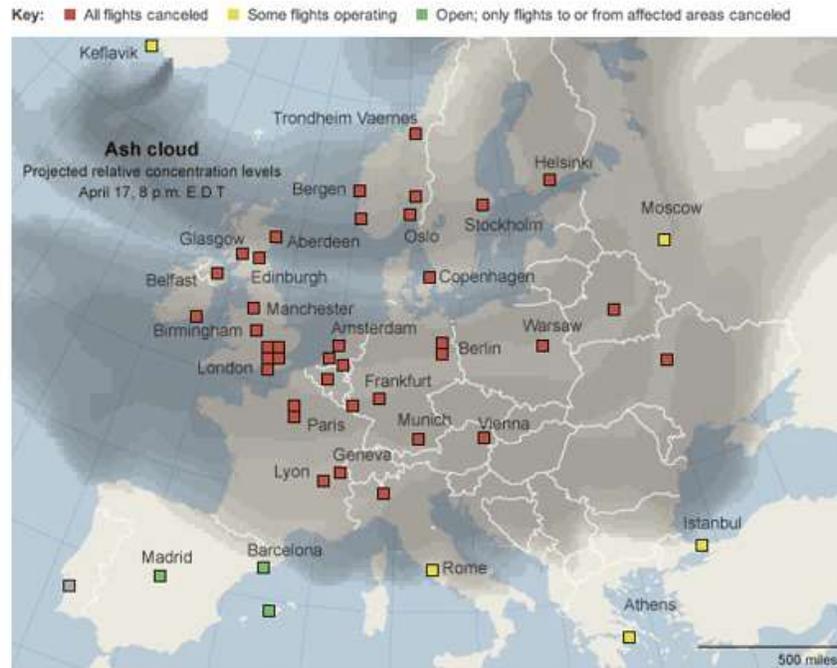


Ilustración 1 Muestra de los aeropuertos afectados por la erupción del volcán Eyjafjallajökull ²



Ilustración 2 Columna de ceniza generada por el volcán Eyjafjallajökull en 2010 ³

² <http://www.metrolic.com/eyjafjallajokull-is-dormant%E2%80%A6for-the-moment-2042/>

³ http://www.picturesocial.com/photo/vulcano-eruption?xg_source=activity

Ahora, gracias al desarrollo de este sistema, se cuenta con un primer acercamiento al problema antes planteado. En este caso, se cuenta con un sistema que muestra mediante imágenes (resultado de la aplicación de diversos factores que permiten el pronóstico de dispersión de la ceniza) el alcance que tendría el material expulsado por el volcán. Igualmente se puede ver en las imágenes las poblaciones que tendrían mayores afectaciones; así, la población puede tener una idea de las medidas que se deben tomar para minimizar los daños y también hacer un pronóstico de las potenciales consecuencias que se generarían.

El trabajo está compuesto por 5 capítulos, en el primero de ellos se tratan antecedentes sobre los estudios que se han hecho sobre el volcán Popocatepetl y sobre la importancia que tiene para la zona en la que se encuentra. En este capítulo se da también una breve introducción a los modelos que se utilizan para hacer el pronóstico de la difusión.

El siguiente capítulo trata sobre el objetivo general del proyecto, los alcances que se buscan tener, etc. Posteriormente, el tercer capítulo trata sobre la descripción del sistema de cálculo empleado para obtener el pronóstico. En este capítulo tratamos principalmente de dar una idea general sobre los elementos que componen los modelos y como éstos interactúan entre sí.

Posteriormente, en el capítulo 4 se habla sobre el sistema que se realizó para poder desplegar las imágenes, así como fragmentos del código fuente en PHP para poder ejemplificar y mostrar el trabajo realizado. Más adelante, en el quinto y último capítulo se presentan los resultados y conclusiones obtenidas al finalizar el proyecto.

Antecedentes

Volcán Popocatépetl



Ilustración 3 Toma de la ciudad de México con el volcán Popocatépetl al fondo.

Popocatépetl deriva su nombre en náhuatl del verbo *popoa* que significa “humo” y del sustantivo *tepetl*, “cerro”; es decir, el “Cerro que humea”, debido a que desde tiempos del México prehispánico ya emanaba esa ligera fumarola que hasta hace un par de años veíamos con cierta tranquilidad, ya que últimamente ha aumentado la actividad del volcán.

⁴ <http://implicado.wordpress.com/2012/05/04/popocatepetl-mexicos-city-view/>

Iztaccihuatl deriva de los vocablos indígenas *iztac*, “blanco” y *cíhuatl* “mujer”, que juntos quieren decir “Mujer blanca”, aunque ahora nosotros la conozcamos con el ya popular nombre de la “Mujer dormida”.

La presencia de estos volcanes era de gran importancia para las culturas mesoamericanas, principalmente para la Mexica que estaba ubicada en el valle de México. Estas culturas han dado origen a diversas leyendas sobre su existencia, siendo la siguiente la más conocida:

Hace tiempo, cuando los aztecas dominaban el Valle de México, los otros pueblos debían obedecerlos y rendirles tributo, pese a su descontento. Un día, cansado de la opresión, el cacique de Tlaxcala decidió pelear por la libertad de su pueblo y empezó una terrible guerra entre aztecas y tlaxcaltecas.

La bella princesa Iztaccíhuatl, hija del cacique de Tlaxcala, se había enamorado del joven Popocatépetl, uno de los principales guerreros de este pueblo. Ambos se profesaban un amor inmenso, por lo que antes de ir a la guerra, el joven pidió al padre de la princesa la mano de ella si regresaba victorioso. El cacique de Tlaxcala aceptó el trato, prometiendo recibirlo con el festín del triunfo y el lecho de su amor.

El valiente guerrero se preparó con hombres y armas, partiendo a la guerra después de escuchar la promesa de que la princesa lo esperaría para casarse con él a su regreso. Al poco tiempo, un rival de Popocatépetl inventó que éste había muerto en combate. Al enterarse, la princesa Iztaccíhuatl lloró amargamente la muerte de su amado y luego murió de tristeza.

Popocatépetl venció en todos los combates y regresó triunfante a su pueblo, pero al llegar, recibió la terrible noticia de que la hija del cacique había muerto. De nada le servían la riqueza y poderío ganados si no tenía su amor.

Entonces, para honrarla y a fin de que permaneciera en la memoria de los pueblos, Popocatépetl mandó que 20,000 esclavos construyeran una gran tumba ante el Sol, amontonando diez cerros para formar una gigantesca montaña.

Desconsolado, tomó el cadáver de su princesa y lo cargó hasta depositarlo recostado en su cima, que tomó la forma de una mujer dormida. El joven le dio un beso póstumo, tomó una antorcha humeante y se arrodilló en otra montaña frente a su amada, velando su sueño eterno. La nieve cubrió sus cuerpos y los dos se convirtieron, lenta e irremediabilmente, en volcanes.

Desde entonces permanecen juntos y silenciosos Iztaccíhuatl y Popocatépetl, quien a veces se acuerda del amor y de su amada; entonces su corazón, que guarda el fuego de la pasión eterna, tiembla y su antorcha echa un humo tristísimo...

Durante muchos años y hasta poco antes de la Conquista, las doncellas muertas por amores desdichados eran sepultadas en las faldas del Iztaccíhuatl.

En cuanto al cobarde tlaxcalteca que por celos mintió a Iztaccíhuatl sobre la muerte de Popocatépetl, desencadenando esta tragedia, fue a morir desorientado muy cerca de su tierra, también se convirtió en una montaña, el Pico de Orizaba y se cubrió de nieve. Le pusieron por nombre Citlaltépetl, o "Cerro de la estrella" y desde allá lejos vigila el sueño eterno de los dos amantes a quienes nunca, jamás podrá separar.⁵

⁵ <http://www.radiocentro.com.mx/grc/redam.nsf/vwALL/MLOZ-5W8VRV>

El Popocatepetl es un volcán que forma parte del eje volcánico transversal mexicano, localizado a 70 km al sureste de la ciudad de México es uno de los volcanes más famosos del mundo, posee una importancia clave para los mexicanos por ser el más activo en la actualidad. Tiene una elevación de 5450 metros y es el segundo más alto después del Pico de Orizaba.

Su primer erupción reportada fue reportada el año 1519, aunque códices prehispánicos reportan una erupción alrededor del año 1350, a partir de esa fecha ha tenido erupciones pequeñas frecuentes y una intensa actividad fumarólica constante.

Gracias a estudios hechos por Claude Robin en 1984 ⁶ sobre el volcán, se sabe que tuvo 2 fases constructivas para llegar a como lo conocemos el día de hoy. El primer periodo constructivo comenzó aproximadamente hace 1 millón de años y duró varios cientos de miles de años. Este periodo produjo el volcán Nexpayantla, un volcán primitivo que constituye la mayor parte del edificio. Después de un periodo de quietud y erosión, aproximadamente hace 100,000 años ocurrió un evento explosivo que dio origen a la estructura que ahora conocemos. El volcán moderno incluye dos unidades principales que son parcialmente contemporáneas, una cámara de andesita y la cima del cono.

Se debe enfatizar el riesgo que presenta el volcán. En el pico de Orizaba un periodo de explosiones de tipo San Vicente (St. Vincent-type)⁷ se registraron hace entre 13,000 y 6000 años, con ciclos e intervalos de 1000 años. En el Popocatepetl esta actividad comenzó al menos hace 5,000 años. Numerosas poblaciones fueron construidas sobre las erupciones en el año 1200 AP⁸ y la de entre 450 y 900 AP siendo esta última reportada en códices prehispánicos. La proximidad de Atlixco y Puebla (> 500,000 personas) hacia las cuales los flujos piroclásticos pueden orientarse, las fechas de los

⁶ Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques.

⁷ <http://helid.digicollection.org/en/d/Jph31s/10.html>

⁸ Antes del Presente (año 450)

eventos pasados y los ciclos de las erupciones muestran que el Popocatepetl puede ser un riesgo muy serio en el futuro.

Puede parecer fuera de lugar hablar de riesgos para un volcán cuya actividad histórica ha sido limitada a erupciones menores. Sin embargo, una de las características de los volcanes andesíticos centrales⁹ es la de engendrar erupciones espaciadas en el tiempo, fuertemente explosivas, destructivas, repentinas y difíciles de prever.

La erupción del Chichón en Chiapas a principios de 1982 es un ejemplo de esta actividad espaciada en el tiempo. En el caso de volcanes de gran volumen, cuya evolución ha sido larga y compleja como en el Popocatepetl, los parámetros de riesgo son muchos, según C. Robin, los principales son:

- El conocimiento de la actividad reciente para la observación directa y/o para estudio vulcanológico, los ritmos eruptivos y su reproductibilidad.
- La talla del volcán y el volumen de los productos implicados.
- El carácter explosivo de las erupciones y su propiedad de extenderse instantáneamente sobre largas superficies. Este punto es particularmente importante puesto que las planicies al sur del volcán sirven de receptáculo para las emisiones, emitidas 3500 metros más arriba.

Los criterios en materia de previsión no están definidos, es imposible determinar si el volcán es o no es un riesgo inmediato. Sin embargo, debido a diversos parámetros se muestra que el Popocatepetl puede representar un riesgo real a mediano plazo. Hay que determinar cuando la fase de quietud relativa del volcán terminará y se presentarán los signos de un despertar próximo.

Una erupción de tipo explosivo es caracterizada por la fragmentación del magma, la generación de material piroclástico, y la generación de una columna eruptiva. El

⁹ <http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/andesite.php>

magma es fragmentado debido principalmente a una rápida descompresión del magma, ya sea en el conducto volcánico durante su ascenso a la superficie, o debido al colapso de un domo de lava o del edificio volcánico en sí mismo. El material piroclástico producto de una explosión se compone principalmente de dos materiales, tefra¹⁰, que se refiere a cualquier fragmento sólido que sale disparado durante una erupción volcánica y ceniza. Por último la columna eruptiva esta compuesta de una mezcla de gases y tefra o piroclastos¹¹.

Ya que la columna eruptiva alcanza la atmósfera se forma una nube de cenizas que se dispersa dependiendo varios factores. La velocidad del viento, la dispersión se ve influenciada en gran parte por la altura que alcanza la columna (altura de inyección). Los sedimentos que sean transportados en la columna, ya que algunos de los materiales pueden caer por gravedad con una velocidad terminal. Y por fenómenos tales como la agregación, la formación de hidrometeoros, factores dependiendo de las condiciones ambientales al momento de la erupción.

Como bien sabemos los riesgos latentes no solo afectarían a las ciudades cercanas, puesto que sismos, expulsión de ceniza, magma, etc. Pueden afectar las condiciones ambientales de ciudades como la Ciudad de México, donde puede verse afectada la visibilidad afectando vuelos, las características de la ceniza permitirían que se afecte la vialidad, construcciones débiles colapsadas por las concentraciones de ceniza, daños en agricultura y ganadería, afectación de calidad del aire, etc. Es importante conocer como sería dispersada la ceniza en caso de una erupción para poder disminuir los riesgos potenciales producto de ésta.

¹⁰ <http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/hazards/primer/tephra.html>

¹¹ http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/sec_14.htm

Modelo Fall3D

Los modelos de transporte y dispersión de cenizas (VATDM¹² por sus siglas en inglés) son modelos que tratan de predecir la acumulación de cenizas resultantes de una erupción volcánica y su trayectoria. Son modelos utilizados por los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC¹³, Volcanic Ash Advisory Centers) junto con una combinación de modelos y monitoreo remoto.

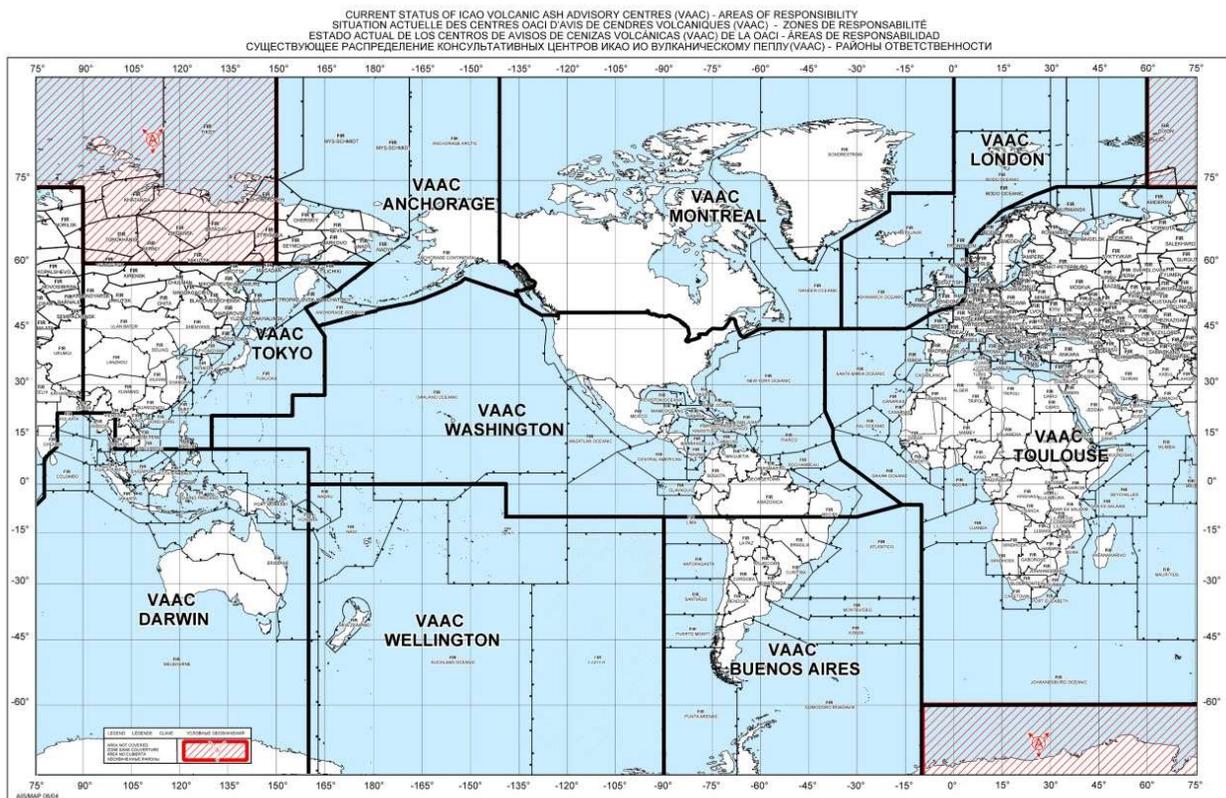


Ilustración 4 Mapa de las áreas de cobertura de los VAAC¹⁴

¹² <http://www.ofcm.gov/ICVAAS/Proceedings2004/pdf/12-session3.pdf>

¹³ Grupo de expertos que se dedican a proveer información a la aviación civil sobre riesgos potenciales en caso de erupciones volcánicas de gran magnitud. <http://www.meteo.fr/vaac/>

¹⁴ http://vaac.arh.noaa.gov/info/VAAC_MAP_BIG.jpg

Como indica el trabajo de Arnau Folch y Antonio Costa (2011)¹⁵ la modelación de cualquier fenómeno incluye siempre:

-Un modelo de emisión que depende de cada caso, ya sea si la fuente es difusa/puntual o si es transitoria/estacionaria.

-Un modelo atmosférico que incluye la resolución de las ecuaciones del fluido y una gran variedad de situaciones según la escala (global, regional, local).

-Un modelo de transporte que describe como es transportado el material y las ecuaciones particulares para cada caso.

Los VATDM se distinguen sobre todo por su modelo de emisión y características propias de los modelos de transporte. Por sus características pueden ser clasificados de dos formas, en función de la escala o por su tipo.

Si se clasifican por su escala influye si es en escala regional o local.

	Escala Local (≈100 km)	Escala Regional (≈1000 km)
Usuario típico	Vulcanólogos	VAACs
Partículas	Lapilli y ceniza gruesa	Ceniza gruesa y fina
Enfoque principal del modelo	Deposito Algunos predicen nubes de ceniza	Nube de ceniza
Aproximación	Euleriano Langrangiano Columna y depósito	Langrangiano (rastreo) Algunos Eulerianos

¹⁵ FALL3D: A Computational Model for Transport and Deposition of Volcanic Ash

También se pueden clasificar en Lagrangianos y Eulerianos:

– Modelos Lagrangianos(Sistema de coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera):

- Siguen la trayectoria de las partículas (llamadas trazadores o puffs) en un campo de vientos dado y añadiendo difusión aleatoria.

- Son usados por la mayoría de los VAACs

- Nacieron dentro de la comunidad meteorológica.

– Modelos Eulerianos(Sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra):

- Basados en la ecuación de advección-difusión-sedimentación (conservación de la masa)

$$\frac{\partial}{\partial x} C_i + \nabla \cdot (UC_i) - \nabla \cdot (Vs_i C_i) = \nabla \cdot (K \cdot \nabla C_i) + S_i$$

Los modelos eulerianos representan la clase más sofisticada de modelos atmosféricos. En ellos las ecuaciones que describen el movimiento y la transformación química de los contaminantes en la atmósfera se resuelven considerando un sistema fijo de coordenadas y la región a modelar se puede dividir en celdas o cajas, tanto horizontal como verticalmente. La concentración de los contaminantes se estima a intervalos específicos de tiempo, tomando en cuenta la información sobre campos meteorológicos tridimensionales, así como las concentraciones iniciales de los contaminantes, las emisiones, el transporte, la dilución y las transformaciones químicas. La aplicación de estos modelos resulta más conveniente cuando existen patrones complejos de emisión (por ejemplo, numerosas y diversas fuentes de emisión, dispersas en un área geográfica amplia) y/o cuando los procesos de transformación química juegan un papel relevante en la generación y destino de los contaminantes (por ejemplo, para contaminantes secundarios). En general, cuando se

cuenta con información suficientemente detallada sobre el inventario de emisiones, la calidad del aire y la meteorología, estos modelos pueden aplicarse para evaluaciones detalladas de calidad del aire a nivel urbano o regional.

Los modelos lagrangianos, éstos se caracterizan por hacer uso de un sistema de referencia que se ajusta al movimiento atmosférico. Es decir, las emisiones, reacciones, deposición y mezclado de los contaminantes se analizan para un volumen de aire que va cambiando su posición de acuerdo con la velocidad y dirección del viento –y no para una región entera como en los *eulerianos*. Bajo este esquema general, los modelos lagrangianos se pueden clasificar como modelos de *trayectoria* y modelos *gaussianos*, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación. Los procesos antes mencionados se pueden simular para una columna hipotética de aire, como en los modelos de trayectoria, en tanto que cuando la simulación se hace para una pluma de emisión, continua o discreta (como paquetes comúnmente llamados “puffs”), se trata de modelos gaussianos.

Los modelos *gaussianos* se describe el transporte y mezcla de los contaminantes asumiendo que las emisiones presentan, en las direcciones horizontal y vertical, una distribución normal o de curva gaussiana con una concentración máxima en el centro de la pluma. Generalmente estos modelos se aplican para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, aunque en ocasiones también se aplican para simular emisiones de fuentes de área y de línea. Otra característica de este tipo de modelos es que normalmente son aplicados para evaluar la dispersión de contaminantes primarios no reactivos, aunque existen versiones que incluyen en su formulación consideraciones especiales para poder simular procesos de deposición y transformación química.

Se tienen ventajas y desventajas al usarse estos modelos:

	A favor	En contra	Ejemplos
Langrangiano	<ul style="list-style-type: none"> • Con pocas partículas se puede estimar la posición de la nube. • Poco costo computacional, útiles durante una emergencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos sólo dan la posición de la nube, no su concentración. • El cálculo de la concentración no es inmediato ni trivial. • Hay pocos estudios sobre el número de partículas necesario para lograr convergencia. • Teóricamente no son óptimos para distancias largas ni escenarios muy difusivos. 	PUFF HYSPLIT¹⁶ NAME MLDPO FLEXPART
Euleriano	<ul style="list-style-type: none"> • Dan la concentración de una forma “natural”. 	<ul style="list-style-type: none"> • La solución numérica tiene un costo computacional alto dependiendo del dominio. • Añaden difusión numérica que depende de la malla. 	FALL3D MOCAGE

¹⁶ http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php

En cualquiera de los casos, se necesitan los siguientes parámetros de entrada.

1. Localización del volcán.
2. Datos meteorológicos, ya sean globales o regionales.
3. Datos volcanológicos
 - a. Granulometría
 - b. Término fuente:
 - i. Altura de la columna eruptiva.
 - ii. Distribución vertical de la masa
 - iii. Flujo de masa (kg/s)

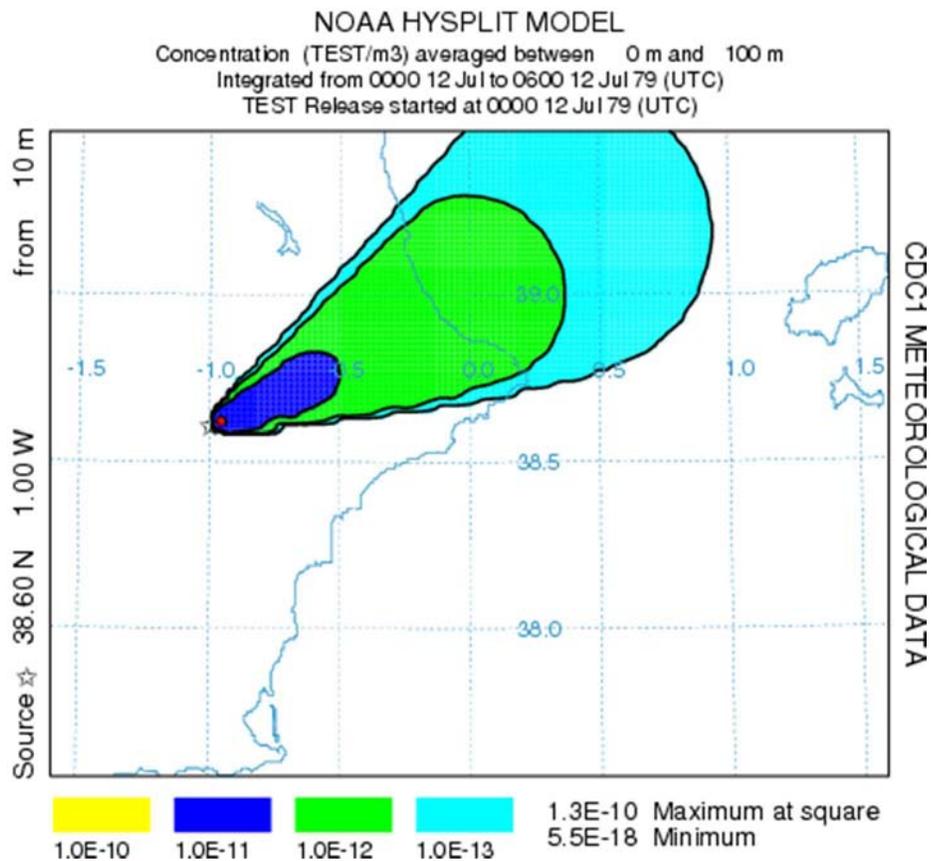


Ilustración 5 Imagen muestra de los resultados obtenidos con HYSPLIT¹⁷

¹⁷ <http://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/hysplit1/spanish/ensembl1.gif>

Fall3D se trata de un modelo 3-D dependiente de tiempo para modelación del transporte y deposición de partículas finas. Este modelo, basado en la forma Euleriana de la ecuación ADS descrita anteriormente, es acoplado con información meteorológica para cuantificar la difusión turbulenta.

El modelo puede ser utilizado para predecir tanto concentración de ceniza en el aire como carga de ceniza a nivel del suelo como sus principales funciones, sin embargo, el modelo puede ser utilizado de igual forma para simular el transporte y deposición de partículas en el aire diferentes a la ceniza volcánica.¹⁸

Modelo WRF

El modelo WRF¹⁹ (Weather Research and Forecasting) es un modelo de predicción numérica climática y simulación atmosférica usado en aplicaciones tanto de pronóstico como de aplicación en casos reales. La eficiencia de su código permite que funcione en cualquier computadora que cumpla los requerimientos de software, sin importar si se trata de supercomputadoras que trabajen en paralelo o laptops.

Los principales componentes del sistema WRF se muestran a continuación:

¹⁸ *FALL3D: A Computational Model for Transport and Deposition of Volcanic Ash*

¹⁹ <http://www.wrf-model.org/>

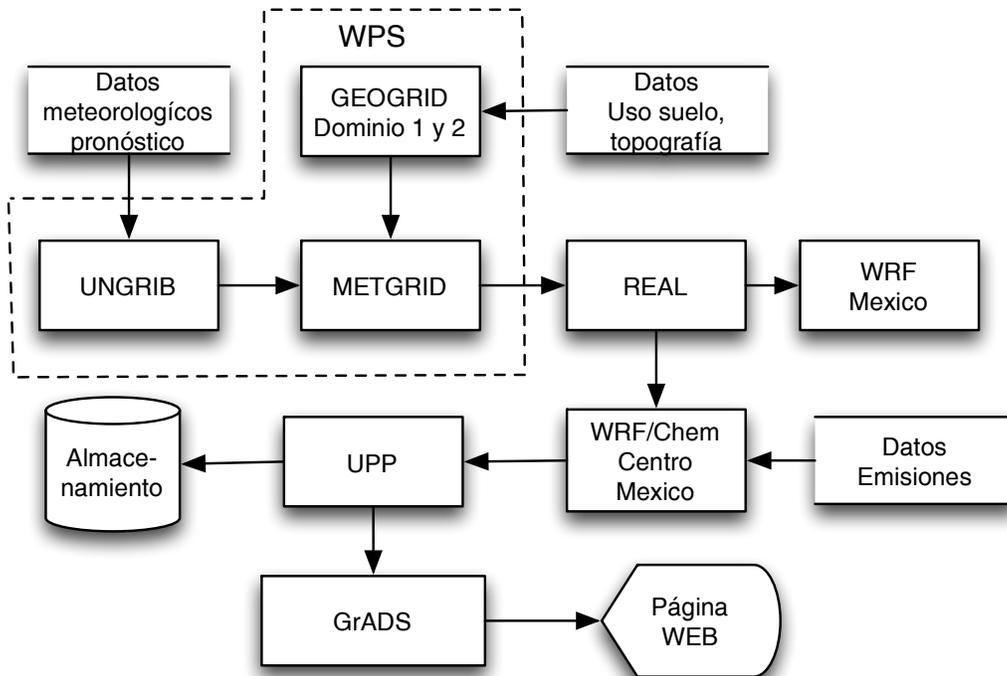


Figura 1 Diagrama de flujo para el pronóstico de calidad del aire, la información meteorológica es transformada por UNGRIB, la topografía y uso de suelo por GEOGRID y ambos productos son entradas de METGRID. La interpolación vertical se realiza en REAL, WRF calcula la meteorología para México y WRF-Chem calcula la meteorología y calidad del aire en el centro de México. Las bases de datos para generar imágenes se hace con UPP y esta información se usa para generar la página web y almacenamiento de los datos.²⁰

²⁰ WPS - WRF preprocessing System, UPP - Unified Post Procesor

Objetivo

El objetivo del presente trabajo, es obtener un modelo de uso para el público general que permita simular el posible comportamiento de una columna de ceniza volcánica producto de una erupción del volcán Popocatepetl.

El modelo debe permitir tomar previsiones como sociedad para tomar las medidas necesarias para disminuir los daños que se pudieran originar de una explosión de este importante volcán.

Así mismo el modelo puede funcionar para que autoridades actúen con un plan de contingencia previsto gracias a los datos arrojados por el modelo, sabiendo lo que puede suceder es más sencillo el actuar, ya sea para despejar poblaciones o para conocer las entidades que se verían afectadas por un fenómeno de esta magnitud.

Descripción del sistema de cálculo.

- Diagrama de Flujo

El flujo de trabajo empleado para la obtención de las imágenes, y su posterior despliegue en el sistema web se muestra a continuación:

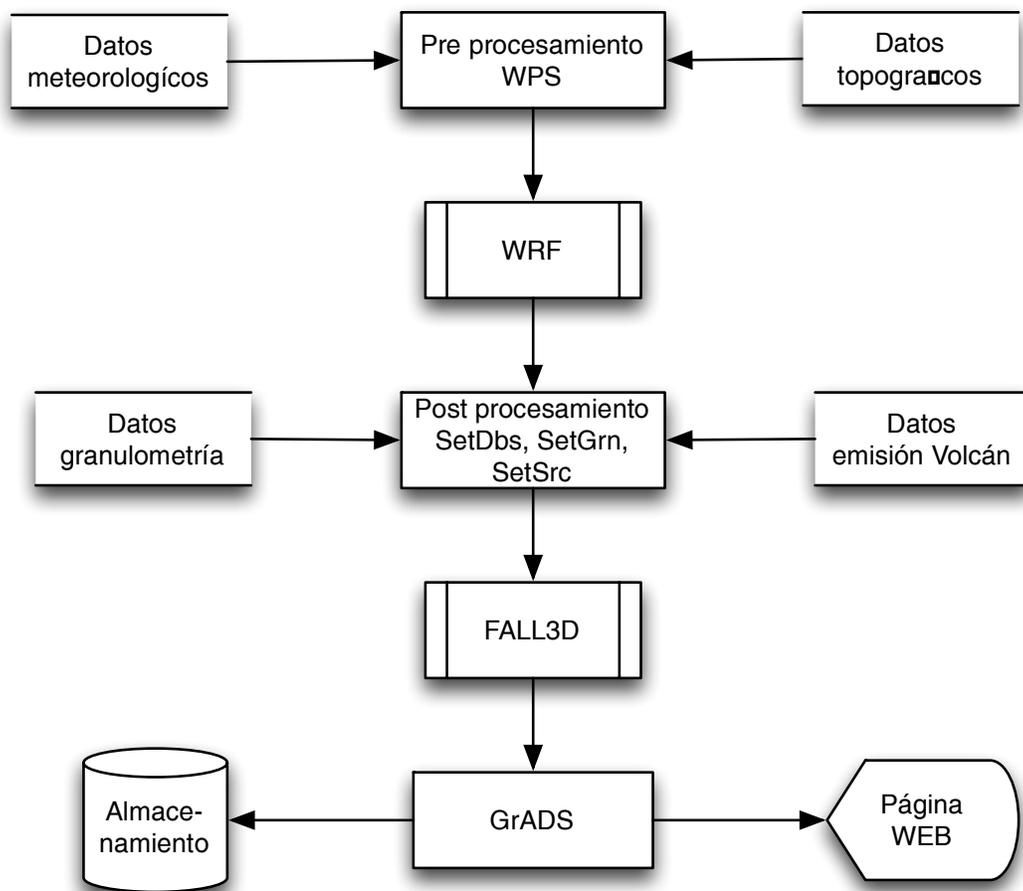


Figura 2 Los datos meteorológicos, de uso de suelo y topográficos se procesan en WPS, el WRF calcula las condiciones meteorológicas en la región, con los resultados de WRF, datos de granulometría y emisión de la emisión volcánica se genera la información usada por FALL3D para la dispersión de cenizas, los resultados se procesan con GRADS para almacenamiento y el despliegue gráfico.

- Fall3D

Fall3D sirve principalmente para modelación del transporte atmosférico de partículas. Como modelo sirve a varios propósitos dependiendo lo que se quiera hacer.

Se puede calcular el depósito de ceniza en el suelo, mediante su aplicación se puede predecir la caída de ceniza así como elaborar mapas de riesgo para indicar las zonas que ser verán más afectadas por dicha ceniza. También es posible calcular la concentración de ceniza en el aire para dar seguimiento a las nubes de ceniza e igualmente elaborar los mapas de riesgo pertinentes, en este caso los mapas son principalmente útiles para la navegación aérea. Por último cabe aclarar que es un modelo que funciona tanto para predicción como análisis de eventos pasados. Teniendo los datos suficientes es posible hacer el análisis.

Se muestra una imagen comparativa de los resultados obtenidos en una modelación con AVHRR²¹ y Fall3D

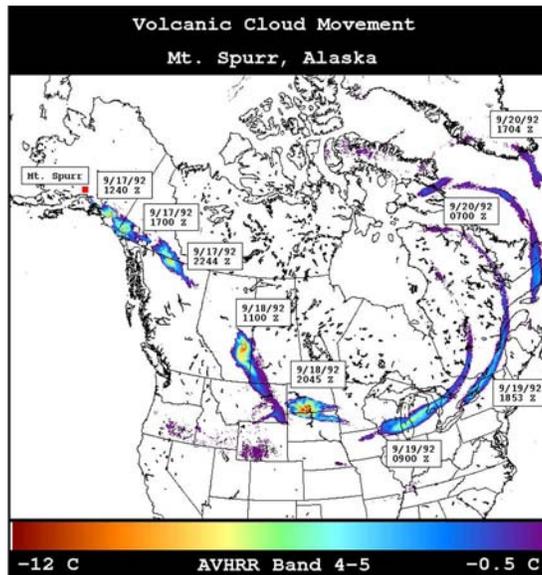


Ilustración 6 Movimiento de las nubes de ceniza producida por la erupción del Monte Spurr en septiembre de 1992²².

Imagen generada con AVHRR

²¹ http://nationalatlas.gov/articles/mapping/a_avhrr.html

19sep1992 at 08:00 AOT at 0.5 micron (-)

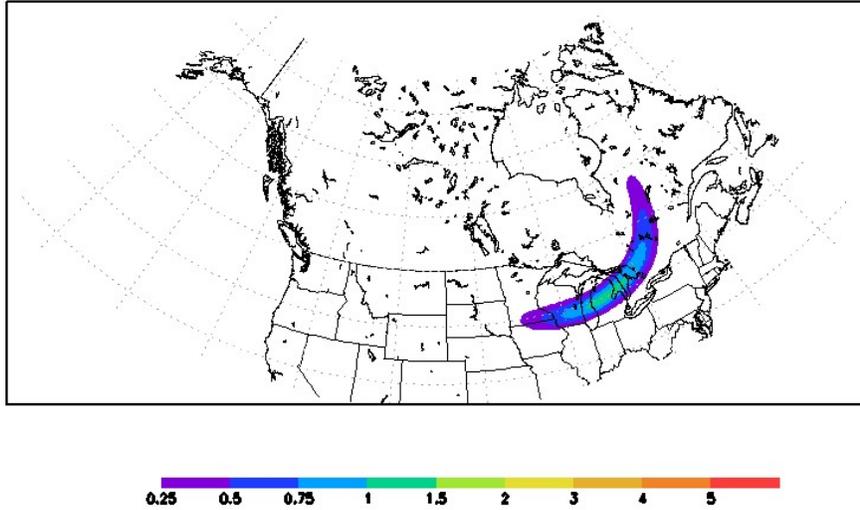


Ilustración 7 Movimiento de las nubes de ceniza producida por la erupción del Monte Spurr en septiembre de 1992²³.

Imagen realizada con Fall3D

Igualmente y como se mencionó con anterioridad permite correr varias escalas dentro del programa para ampliar la malla que se trabaja. Esto depende principalmente de la partícula que se simule y la aplicación que se le dé, sabiendo que las partículas más gruesas y pesadas no viajan distancias tan grandes como las partículas finas y ligeras.

El modelo se basa en la ecuación de difusión-advección-sedimentación (ADM por sus siglas en inglés), que es calculada para cada partícula de la que se quiera conocer su trayectoria.

$$\frac{\partial}{\partial x} C_i + \nabla \cdot (U C_i) - \nabla \cdot (V S_i C_i) = \nabla \cdot (K \cdot \nabla C_i) + S_i$$

22 <http://bsccase02.bsc.es/projects/fall3d/Images/MtSpurrSep1992.AVHRR.gif>

23 <http://bsccase02.bsc.es/projects/fall3d/Images/MtSpurrSep1992.aot05.animated.gif>

Esta ecuación es dividida de la siguiente forma:

1. Término de Advección: $\nabla \cdot (UC_i)$. Se refiere al transporte debido al arrastre del viento "U".
2. Término de Difusión: $-\nabla \cdot (Vs_i C_i)$. Refleja la turbulencia atmosférica de sub-escala a través del tensor de difusión turbulenta.
3. Término de Sedimentación: $\nabla \cdot (K \cdot \nabla C_i)$. Se refiere al sedimento que se origina debido a la caída de las partículas por su propio peso. Se calcula a partir de varios micrones de tamaño.
4. Término fuente: S_i . Se refiere a la cantidad de masa que se inyecta a la atmósfera en la columna eruptiva.

La ecuación debe ser calculada para cada tamaño de partícula, sin embargo, el tamaño no es el único factor determinante de la velocidad de caída, ya que su forma y densidad también influyen. Cada partícula se puede dividir en clases, caracterizados por tres valores principalmente que indican la distancia que pueden recorrer, así como sus materiales. La clase no depende exclusivamente del tamaño sino también de su litología, ya sea si son materiales líticos, pómez, etc. Los valores que caracterizan una clase son:

ρ^{24} Se refiere a la densidad de la partícula.

φ^{25} . Se refiere al diámetro de la partícula.

ψ^{26} Se refiere a la esfericidad o forma de la partícula.

²⁴ *Ro*

²⁵ *Phi*

Dependiendo de estos factores las partículas pueden tener las siguientes características:

	Bombas y Bloques	Lapilli	Ceniza gruesa	Ceniza delgada
Diámetro	> 64 mm	(64mm, 2mm)	(2mm, 64µm)	(64µm, 1µm)
Velocidad terminal de caída	≈ 100 m/s	≈10 m/s	≈ 1m/s	< 0.1 m/s
Tiempo de residencia	≈ segundos	≈ minutos	≈ horas, incluso pocos días	Varios días
Distancia	Proximal ≈ 1km	Medial ≈ 10km	Distal ≈ 100km	Muy distal ≈ 1000km

Tabla 1 Relación entre los materiales piroclásticos, sus tiempos de caída y distancia de viaje.

El diámetro por razones históricas suele ser representado por el número φ

	$d(mm) = 2^{-\Phi}$		Tamaños típicos						Sensibilidad remota				
φ	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
d	16 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	250 µm	125 µm	64 µm	32 µm	16 µm	8 µm	4 µm
	Lapilli	Ceniza gruesa						Ceniza fina					
	10s km	100s km						1000s km					

Tabla 2 Diámetros típicos de ceniza.



Ilustración 8 Lapilli ²⁷



Ilustración 9 Ceniza gruesa

²⁷ <http://www.swisseduc.ch/stromboli/glossary/icons/lapilli.jpg>



Ilustración 10 Ceniza delgada²⁸

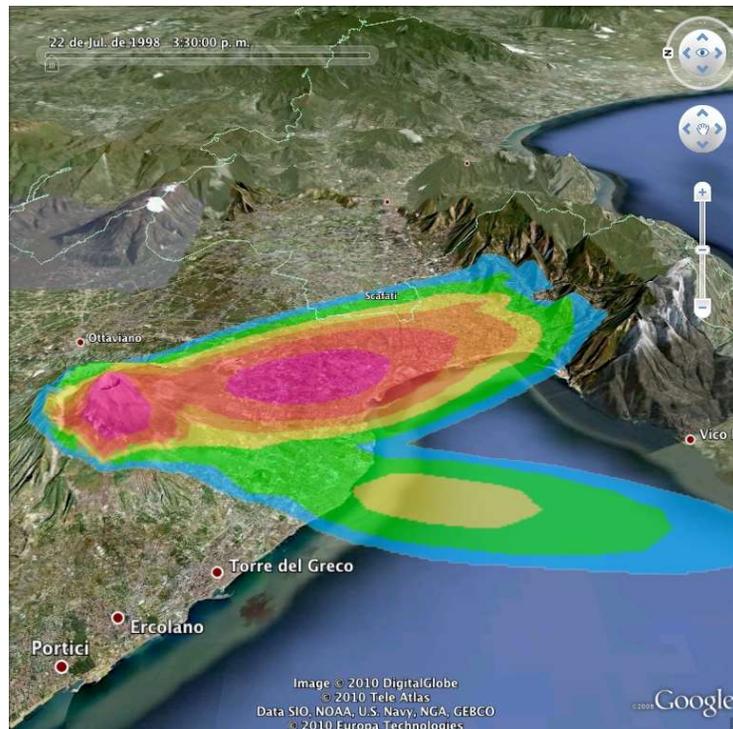


Ilustración 11 Espesor del sedimento (mm) producido por la erupción del volcán Vesubio en marzo de 1944. Imagen generada con Fall3D²⁹

28 <http://www.eeescience.utoledo.edu/faculty/stierman/rkx/ash.htm>

29 <http://bsccase02.bsc.es/projects/fall3d/Images/Etna1998-depload-google.jpg>

- Grads

GrADS (Grid Analysis and Display System) es una herramienta interactiva de escritorio que es utilizada para la manipulación, acceso y visualización de datos relacionados a ciencias de la tierra, cuenta con dos modelos para manejar datos de estaciones y por mallas. Es compatible con muchos de los Sistemas Operativos más utilizados y se distribuye libremente por internet.

GrADS utiliza un ambiente de datos de 5 dimensiones: las cuatro dimensiones convencionales (latitud, longitud, nivel vertical y tiempo) y una opcional quinta dimensión para las mallas. El Software puede manejar mallas tanto regulares, espaciadas no linealmente, Gaussianas o de resolución variable. Utiliza la línea de comandos que le permite recibir instrucciones muy similares a las utilizadas en lenguaje FORTRAN. Las operaciones son ejecutadas interactivamente.

Adicionalmente los usuarios pueden agregar funcionalidad introduciendo sus propias funciones aunadas a la gran variedad que otorga el Software por si mismo. Estas instrucciones pueden ser escritas como rutinas externas en cualquier lenguaje de programación.

Los datos pueden ser representados de diversas formas dependiendo la utilidad que se le quiera dar: gráficas de línea y barras, contornos con formas, vectores de viento, cajas de rejillas, etc. Los resultados pueden ser presentados como PostScript o como algún formato de imagen conocido dependiendo de la configuración que se le haya dado. GrADS provee defaults intuitivos dentro del campo geofísico, el usuario sin embargo tiene la capacidad de controlar todos los aspectos de la salida de los gráficos.

Todo el proceso de consulta de archivos, calculo de variables y generación de las imágenes está programado como un proceso automático que comienza a ejecutarse a partir de las 5:30 AM. Después de la ejecución de este programa se tienen con todos los elementos necesarios para presentar las imágenes dentro del sitio que se construyó para dicho motivo. En caso de fallas el proceso toma los datos del día

anterior y genera la información como si nada hubiera fallado. Debido a la similitud de las condiciones normales entre un día y otro es difícil que se presente una diferencia significativa, sin embargo, esta puede presentarse en caso que haya algún fenómeno que afecte de manera importante las condiciones de un día normal.

La ejecución del programa es mediante un Script que manda a llamar al software necesario (Fall3D, Grads) enviando un archivo extensión .gs y los demás datos requeridos.

Como datos de entrada se tienen 2.4GB de datos en formato NetCDF, de los cuales Fall3D utiliza 1.2 GB de esta información para enviarlos a Grads y terminar con el procesamiento de la información para generar las imágenes que se van a desplegar.

El resultado consta de 1 GB de información en formato NetCDF, 4.2 MB de imágenes estáticas, 3.8 MB de animaciones (imágenes .gif), 1.7MB de archivos formato KMZ para Google Earth y 73 MB de datos tipo grid.

Descripción interfaz gráfica

PHP (Hypertext PreProcessor) es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de código abierto. Está principalmente destinado a programadores web que desean desarrollar páginas dinámicas mediante el uso de campos, tablas, bases de datos y formularios para obtener y desplegar información. Es fácilmente insertable dentro del código HTML de una página y permite ser visto en prácticamente cualquier dispositivo. La mayor parte de su sintaxis es muy similar al lenguaje C, Java, Perl, etc.

Es un lenguaje sencillo de aprender y que permite desarrollar páginas web dinámicas de una forma rápida y sencilla. Dentro de sus capacidades está el poder hacer verificación de campos, consultas a bases de datos, adquisición de datos mediante formularios, juegos, en fin, muchas cosas que están prácticamente limitadas a lo que el programador quiera hacer con este lenguaje.

El servidor sobre el que está montado el sistema es un servidor Mac localizado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, cuenta con el poder de cómputo suficiente para poder realizar los cálculos y la generación de las imágenes, posteriormente se envían a la parte pública del servidor para poder ser desplegadas.

El sistema utiliza las imágenes generadas durante la etapa de cálculo y que son resultados de la combinación del modelo WRF y el modelo Fall3D. Funciona como módulo adicional sobre un Sistema de gestión de contenidos (Content Manager System CMS) Drupal. El sistema está dividido en dos documentos PHP para poder facilitar la visualización de los datos por su categoría.

Las imágenes son creadas con el siguiente formato para su ubicación.

Popo1.DiaMesAño.Hora:Minuto.Variable.gif

Esto da como resultado la ubicación de una imagen que se puede encontrar con el nombre:

Popo1.18may2011.12:00.colmass.gif

Las imágenes se encuentran ubicadas en un directorio diferente dependiendo del día, mes y año que se quieran visualizar.

Primeramente se obtiene la fecha que tiene el servidor para poder localizar las imágenes que se generaron del día en curso, así como el directorio donde se encuentran guardadas. Obtenemos los datos y son convertidos en el formato antes mencionado para localizar los directorios y las imágenes. Se inicializan valores para evitar el tener valores basura y poder así eliminar errores, igualmente los valores menores a 10 son anteceditos por un 0 para obtener días de dos dígitos.

```
$sday=1;
$smmonth = 1;
$shour = 12;

if($smmonth<10)
$scsmmonth="0".$smmonth;
else
$scsmmonth.=$smmonth;

if($sday<10)
$scsday="0".$sday;
else
$scsday.=$sday;

/* now */
$nday = date("d");
$nmmonth = date("m");
$nmmonth = date("M");
$nyear = date("Y");
```

Los meses son convertidos posteriormente para poder ubicar las imágenes localizadas, también se convierte la primer letra en minúscula de acuerdo con el formato que tienen las imágenes.

```
if($month == 'Jan'){
    $month = 'jan';
} elseif($month == 'Feb'){
    $month = 'feb';
} elseif($month == 'Mar'){
    $month = 'mar';
} elseif($month == 'Apr'){
    $month = 'apr';
} elseif($month == 'May'){
    $month = 'may';
} elseif($month == 'Jun'){
    $month = 'jun';
} elseif($month == 'Jul'){
    $month = 'jul';
} elseif($month == 'Aug'){
    $month = 'aug';
} elseif($month == 'Sep'){
    $month = 'sep';
} elseif($month == 'Oct'){
    $month = 'oct';
} elseif($month == 'Nov'){
    $month = 'nov';
} else{
    $month = 'dec';
}
```

Igualmente debemos saber que mes está en curso para saber la cantidad de días que tiene cada mes.

```
if($nday < 1)
{
    if($nmonth > 1)
    {
        $nmonthone = $nmonth - 1;
        $nmod = $nyear % 4;

        $inmonth = $nmonthone;
        if($nmonthone == 1
        || $nmonthone == 3
        || $nmonthone == 5
        || $nmonthone == 7
        || $nmonthone == 8
```

```

    || $nmonthone==10
    || $nmonthone==12)
    {
        $nday=31;
    }
    else if($nmonthone==4
        || $nmonthone==6
        || $nmonthone==9
        || $nmonthone==11)
    {
        $nday=30;
    }
    else if($nmonthone==2
        && $nmod==0)
    {
        $nday=29;
    }
    else if($nmonthone==2
        && $nmod!=0)
    {
        $nday=28;
    }

    $nmonth=$nmonthone;
}
else
{
    $nmonth=12;
    $nday=31;
    $nyear=$nyear-1;
}
}
}

```

Posteriormente se obtiene el dominio que se está trabajando y la variable que se va a desplegar. En éste caso la variable default es de masa en la columna 'colmass' y el dominio es el volcán, éste último valor no cambia.

```

if(isset($_GET['dom']) && isset($_GET['type']))
{
    $domain = $_GET['dom'];
    $value = $_GET['type'];
}
else
{
    $domain = 'volcan';
    $value = 'colmass';
}

```

Se genera un arreglo de las variables que serán desplegadas en cada archivo PHP. La diferencia entre un archivo y otro es simplemente éste arreglo mencionado. El primer archivo maneja las variables que tienen que ver directamente con la columna eruptiva. El segundo archivo contiene la altura de vuelo a la que sería visible la columna y afectaría la visibilidad para la navegación aérea.

```
$variables = array('colmass','deplod','depthick');
```

```
$variables = array('fl050','fl100','fl150','fl200','fl250','fl300');
```

```
$plots = array(  
    'colmass'=> 'Masa en la columna',  
    'depthick'=> 'Espesor de sedimento',  
    'deplod'=> 'Carga del depósito'  
    );  
}
```

```
$plots = array(  
    'fl050'=> 'Nivel de vuelo <br> FL50',  
    'fl100'=> 'Nivel de vuelo <br> FL100',  
    'fl150'=> 'Nivel de vuelo <br> FL150',  
    'fl200'=> 'Nivel de vuelo <br> FL200',  
    'fl250'=> 'Nivel de vuelo <br> FL250',  
    'fl300'=> 'Nivel de vuelo <br> FL300'  
    );  
}
```

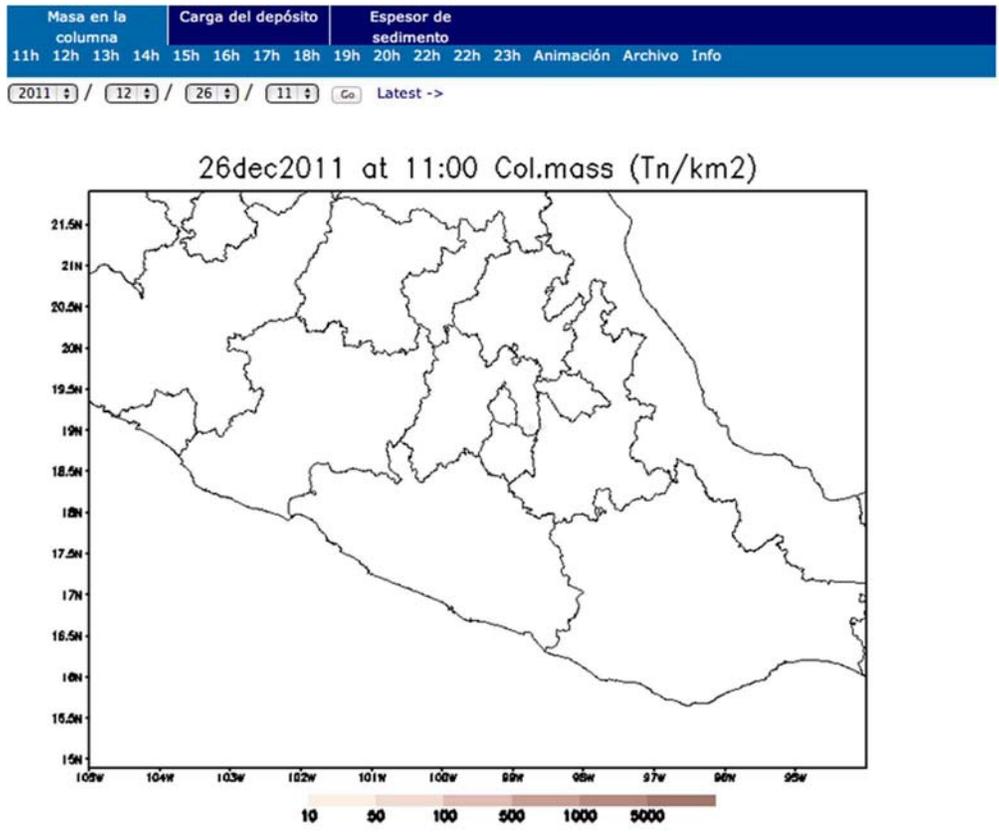
Se utiliza una ruta para ubicar las imágenes que se van a desplegar sabiendo el dominio que se trabaja. En este caso el dominio no cambia, pero se tiene flexibilidad en caso que se quiera añadir un dominio adicional posteriormente.

```
if($value<>'colmass')  
{  
    $url = "http://132.248.8.24/~pronos/visual/images/$domain";  
}
```

Finalmente las imágenes son mostradas mediante el envío de código HTML para el despliegue de la página con el siguiente código:

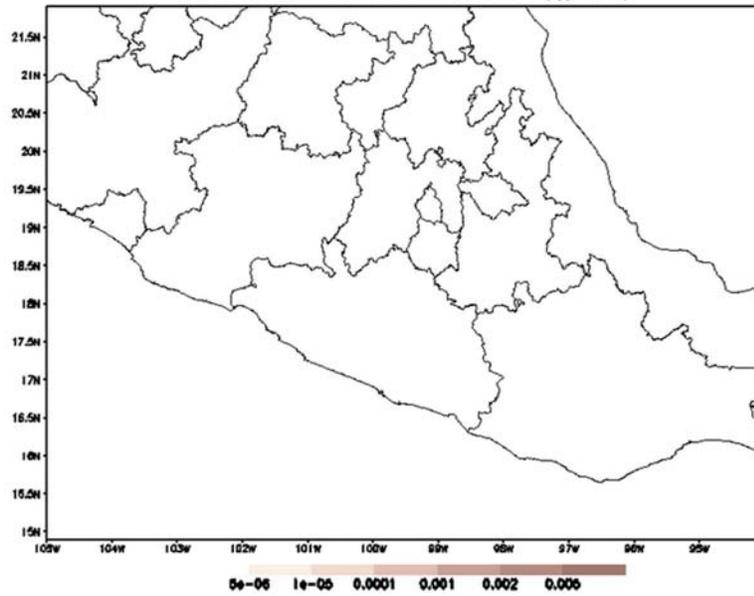
```
<span></span>

Se tiene también un archivo PHP que contiene una breve explicación sobre las alturas de vuelo que se están desplegando, contienen información útil para que el usuario de la página web sepa a que se refieren los estándares de altura de vuelo nominal.



Visualización del archivo visual\_volcan.php

26dec2011 at 11:00 FL050 (g/m3)



Visualización del archivo visual\_volcan2.php

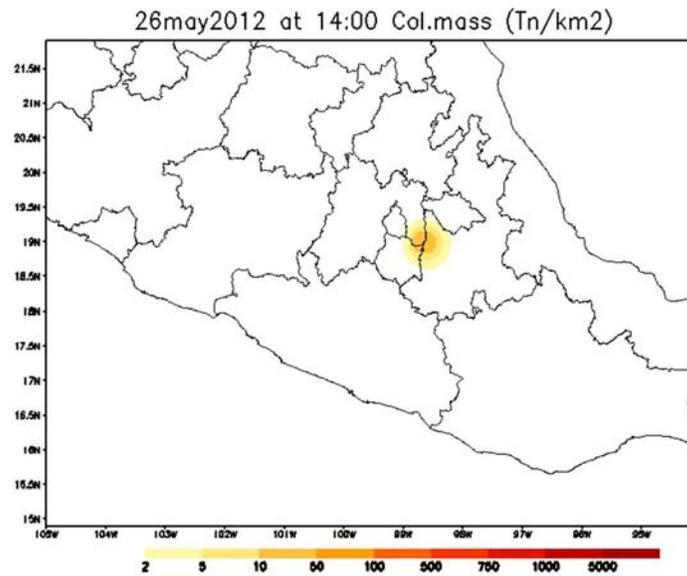
## Resultados y Conclusiones

### Resultados

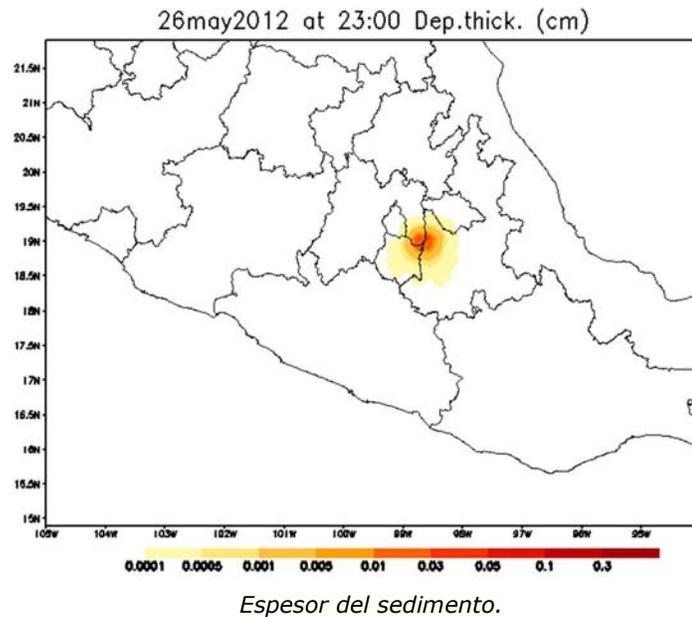
El sistema es funcional desde noviembre de 2011. Genera aproximadamente 300 imágenes que se organizan en directorios según la fecha para poder ubicarlas fácilmente. Dentro de cada directorio están las imágenes del día actual y un día posterior. Cada una de las imágenes es generada con un espacio de una hora de diferencia. La interfaz muestra las imágenes a partir de las 11:00 horas y hasta las 23:00 horas del mismo día.

Los dominios a los que pertenecen las imágenes se describen a continuación.

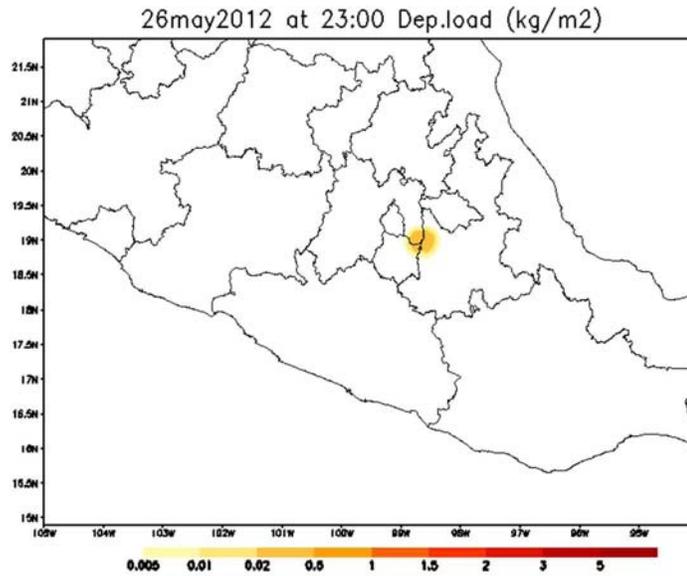
- *Col. Mass.* Se refiere a la masa en la columna eruptiva, es decir, la cantidad de material piroclástico que se arroja en la columna eruptiva. Las imágenes muestran la cantidad de material en toneladas por kilómetro cuadrado (Tn/Km<sup>2</sup>).



- *Dep. Thick.* Espesor del sedimento. Se refiere al espesor del sedimento generado por la caída de material piroclástico que sigue a la erupción. Esto quiere decir el depósito remanente en el suelo medido en centímetros. Este sedimento varía dependiendo el material arrojado como explicamos anteriormente. La ceniza más ligera viaja mayores distancias pero ocupa un espacio menor.



- *Dep. Load.* Carga del depósito. Se refiere a la cantidad de masa remanente después de la erupción. Es medida en kilogramos sobre metro cuadrado ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). Las imágenes muestran la cantidad de material piroclástico remanente en el suelo según su masa total. Como es de esperarse, la mayor cantidad de material acumulado se encuentra en las zonas aledañas al volcán.

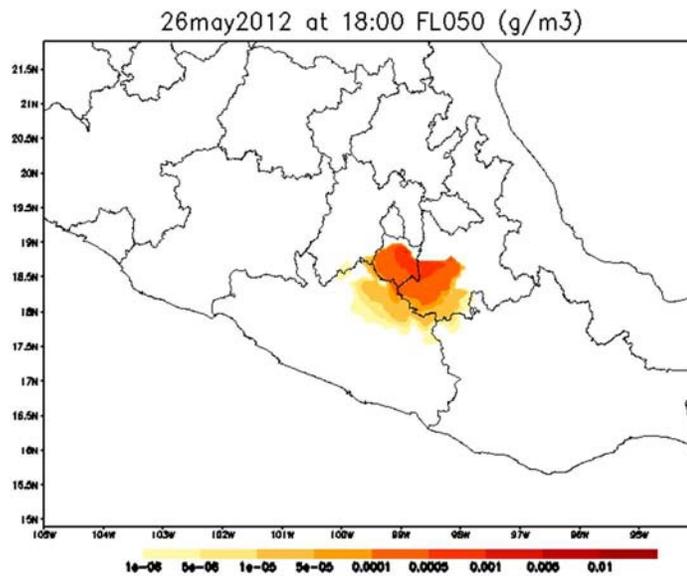


*Cantidad de material acumulado según su masa.*

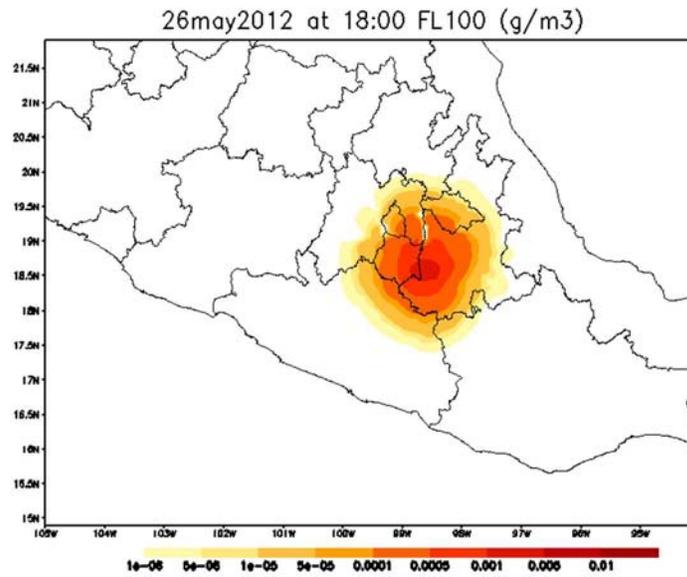
Otra de las variables que se manejan en el estudio es la altura de vuelo. Esta se define como un estándar para la aviación usada para conocer la altitud en pies a la que vuelan las aeronaves. Es la altitud que se utiliza para evitar colisiones entre aeronaves, se usa como estándar en lugar de la altitud real relacionada al suelo. Se expresa en centenares de pies.

En las imágenes se muestra la ceniza acumulada en caso de erupción. Esto es útil ya que se conocería la cantidad de ceniza que puede afectar la visibilidad para ciertos vuelos.

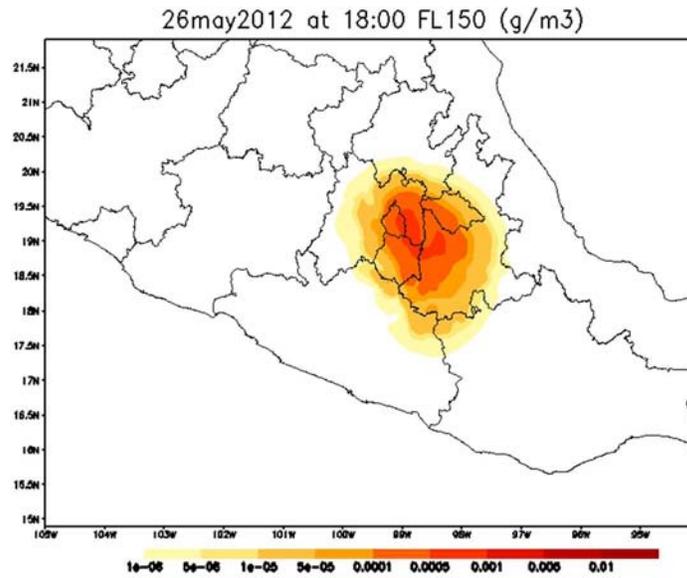
- *FL050*. Nivel de vuelo 050 = 5000 pies ó 1524m.



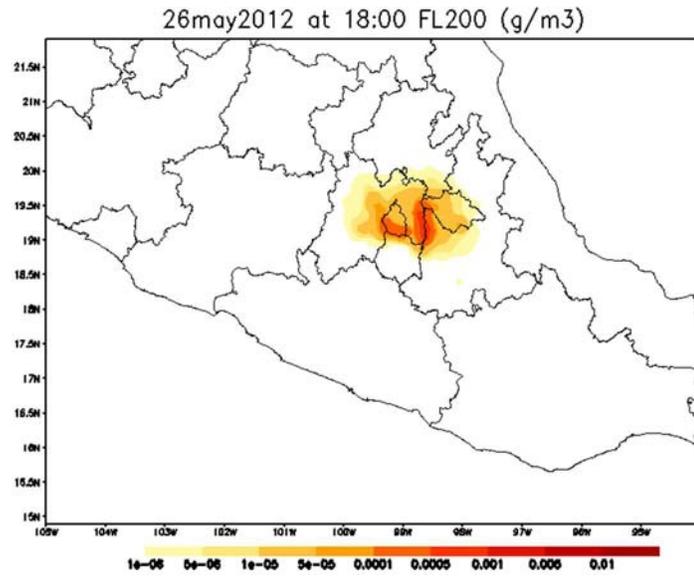
- *FL100*. Nivel de vuelo 100 = 10000 pies ó 3048m.



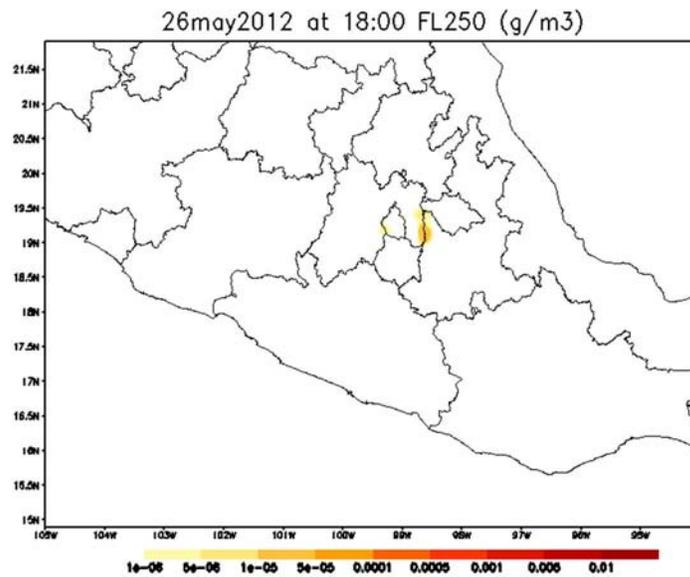
- *FL150*. Nivel de vuelo 150 = 15000 pies ó 4572m.



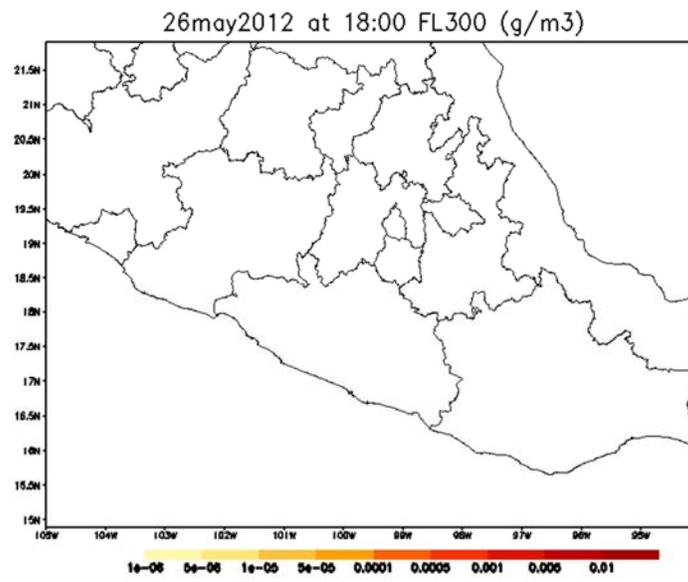
- *FL200*. Nivel de vuelo 200 = 20000 pies ó 6096m.



- *FL250*. Nivel de vuelo 250 = 25000 pies ó 7620m.



- *FL300*. Nivel de vuelo 300 = 30000 pies ó 9144m.



## *Conclusiones*

El desarrollo de este sistema ha otorgado una forma de presentar a la población un sistema que permite conocer el posible comportamiento de la ceniza volcánica que resultaría de la erupción del volcán Popocatepetl. En esta fase inicial se ha podido hacer que el sistema muestre las imágenes que se solicitan.

Aún se tiene mucho potencial en este desarrollo. Se prevé añadir funcionalidad para Google Earth mediante archivos KMZ<sup>30</sup> que permitan mostrar de otra forma los resultados, siendo aún más amigable la muestra de los resultados.

También se busca extender la funcionalidad del sitio añadiendo otros volcanes, en primer lugar el volcán de fuego de Colima.

Actualmente el sitio ha sido referenciado por varias páginas de interés general incluido el sitio del Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, sitios de noticias como el Excelsior, etc.

---

<sup>30</sup> [http://earth.google.com/intl/es\\_MX/outreach/tutorial\\_kmz.html](http://earth.google.com/intl/es_MX/outreach/tutorial_kmz.html)

## Bibliografía y referencias

Costa, A. Folch, A. (2011). El modelo FALL3D. Parte 1: Introducción al modelo. Segunda reunión de la red iberoamericana para el monitoreo y modelización de cenizas y aerosoles volcánicos.

Robin, C. (1984). Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. Bulletin Volcanologique, 47(1), 1-23.

Skamarock, William C. Klemp, Joseph B. Et ál. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3

Costa, A. Folch, A., Macedonio, G. (2008). FALL3D: A Computational Model for Transport and Deposition of Volcanic Ash

<http://www.php.net/manual/es/preface.php>

<http://www.iges.org/grads/grads.html>

<http://www.ine.gob.mx/calibre-herramientas-analisis/582-calibre-tipos-modelos>

## Ilustraciones

|                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>ILUSTRACIÓN 1 MUESTRA DE LOS AEROPUERTOS AFECTADOS POR LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN EYJAFJALLAJÖKULL .....</i>                                              | <i>3</i>  |
| <i>ILUSTRACIÓN 2 COLUMNA DE CENIZA GENERADA POR EL VOLCÁN EYJAFJALLAJÖKULL EN 2010 .....</i>                                                             | <i>3</i>  |
| <i>ILUSTRACIÓN 3 TOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO CON EL VOLCÁN POPOCATÉPETL AL FONDO.....</i>                                                                | <i>5</i>  |
| <i>ILUSTRACIÓN 4 MAPA DE LAS ÁREAS DE COBERTURA DE LOS VAAC.....</i>                                                                                     | <i>11</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 5 IMAGEN MUESTRA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON HYSPLIT.....</i>                                                                         | <i>16</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 6 MOVIMIENTO DE LAS NUBES DE CENIZA PRODUCIDA POR LA ERUPCIÓN DEL MONTE SPURR EN SEPTIEMBRE DE 1992· IMAGEN GENERADA CON AVHRR.....</i>   | <i>21</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 7 MOVIMIENTO DE LAS NUBES DE CENIZA PRODUCIDA POR LA ERUPCIÓN DEL MONTE SPURR EN SEPTIEMBRE DE 1992· IMAGEN REALIZADA CON FALL3D.....</i> | <i>22</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 8 LAPILLI .....</i>                                                                                                                       | <i>25</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 9 CENIZA GRUESA.....</i>                                                                                                                  | <i>25</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 10 CENIZA DELGADA .....</i>                                                                                                               | <i>26</i> |
| <i>ILUSTRACIÓN 11 ESPESOR DEL SEDIMENTO (MM) PRODUCIDO POR LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN VESUBIO EN MARZO DE 1944. IMAGEN GENERADA CON FALL3D.....</i>          | <i>26</i> |

# ANEXO A

# El modelo de dispersión FALL3D

## Parte 4: Funcionamiento y ficheros I/O

Arnau Folch

Barcelona Supercomputing Center (BSC-CNS), Barcelona, España

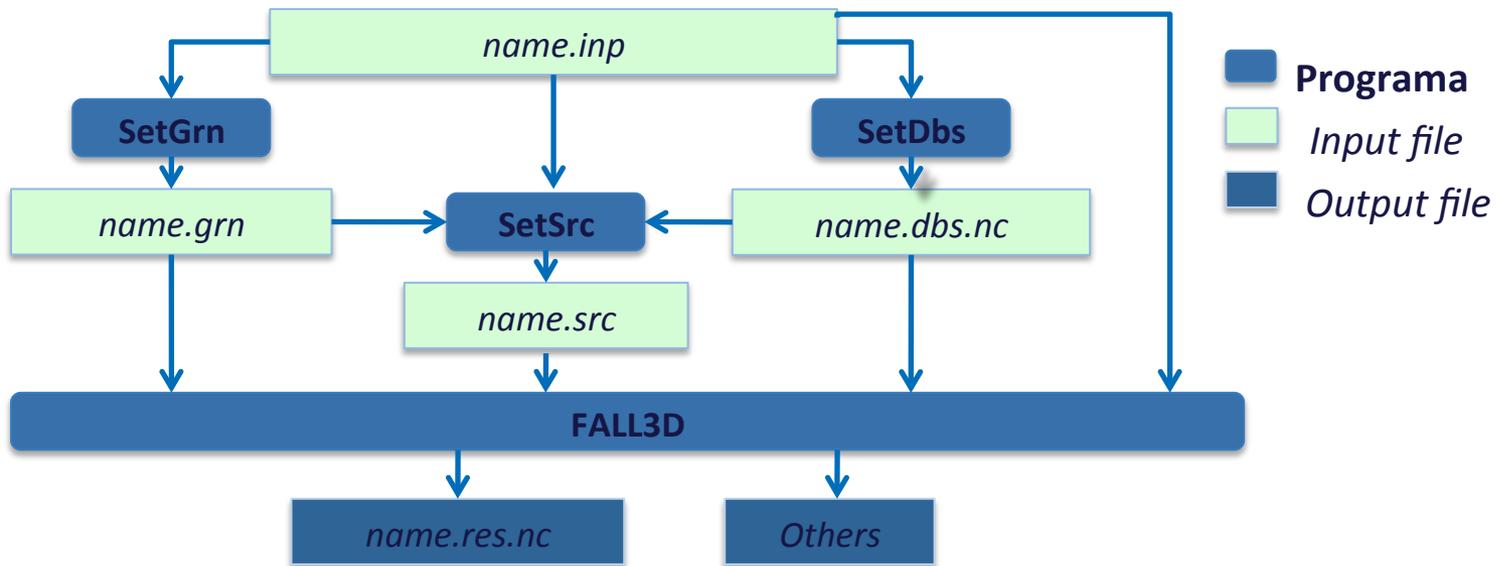
**TERCERA REUNIÓN DE LA RED IBEROAMERICANA PARA EL MONITOREO Y MODELIZACION  
DE CENIZAS Y AEROSOLAS VOLCANICOS**

Salta, 14 de Abril de 2012

## Contenido:

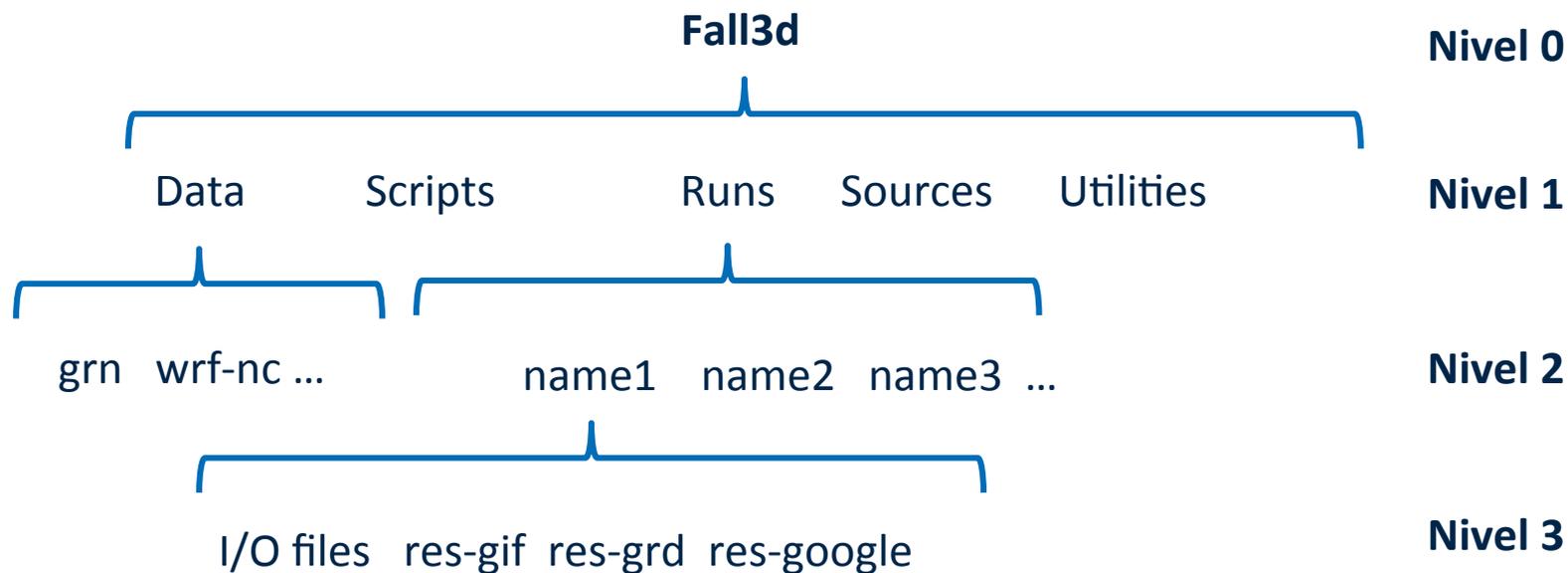
1. Flujo de ejecución
2. Estructura de directorios por defecto
3. Ficheros de entrada
4. Ficheros de salida
5. Programas auxiliares

- o Recordemos el **flujo de ejecución** para un problema típico:
  - 1.- Correr el programa **SetDbs** para generar la base de datos meteorológicos.
  - 2.- Correr el programa **SetGrn** para generar la granulometría. Opcional.
  - 3.- Correr el programa **SetSrc** para generar el término fuente. Hay que tener “datos” sobre altura de columna o asumir un escenario.
  - 4.- Correr **FALL3D** en versión serie o paralela.



## Estructura de directorios por defecto

- o Los nombres y localización de los ficheros se pasan a los programas a través de argumentos de llamada.
- o El usuario puede organizarse como quiere. Sin embargo, se recomienda la **estructura de carpetas por defecto**:



Directorio **Data**

Ficheros (o links) con datos meteorológicos

Directorio **Scripts**

Scripts para ejecución de programas (no tocar).

Directorio **Runs**

Ejecuciones. Una carpeta para cada simulación.

Directorio **Sources**

Fuentes (no tocar).

Directorio **Utilities**

Fuentes programas auxiliares (no tocar).

o **Fall3d** necesita los siguientes **ficheros de entrada**:

- 1.- Un **fichero de control** (llamado *nombre.inp*) donde se especifican parámetros y opciones del modelo. Este fichero también lo leen otros programas auxiliares.
- 2.- Una **base de datos** en formato netCDF (llamado *nombre.dbs.nc*) con los datos meteorológicos durante el intervalo de tiempo que queremos simular. Los datos se pueden generar a partir de varios tipos de modelos. Por ejemplo:
  - NCEP-1 reanálisis.
  - Perfil vertical (sondeo).
  - WRF.
- 3.- Un **fichero de granulometría** (llamado *nombre.grn*) especificando las propiedades de las clases de partículas (bins).
- 4.- Un fichero especificando el **término fuente** (*nombre.src*), es decir la descripción de la columna eruptiva en función del tiempo.
- 5.- Opcionalmente, un fichero (llamado *nombre.pts*) especificando una lista de puntos donde se hará el “tracking”.

### 1. Fichero *nombre.inp*

- o Fichero ASCII donde se definen los parámetros y opciones del modelo.
- o El fichero está estructurado en una serie de bloques.
- o Cada programa lee solamente alguno de los **bloques**:

**TIME.UTC** Leído por **Fall3d**, **SetDbs** and **SetSrc**. Parámetros relacionados con tiempo.

**GRID** Leído por **Fall3d**, **SetDbs** and **SetSrc**. Parámetros de la malla.

**GRANULOMETRY** Leído por **SetGrn**. Parámetros relacionados con la granulometría.

**SOURCE** Leído por **SetSrc**. Parámetros relacionados con el término fuente.

**FALL3D** Leído por **Fall3d**.

**OUTPUT** Leído por **Fall3d**.

- o En práctica, **es el único fichero que el usuario debe tocar**.
- o Cada simulación debe tener su propio fichero (por defecto en una carpeta de llamada igual).
- o En régimen operacional solo hay que cambiar la fecha de este fichero.

## TIME.UTC

YEAR = 2008

MONTH = 04

DAY = 29

BEGIN\_METEO\_DATA\_(HOURS\_AFTER\_00) = 0

TIME\_STEP\_METEO\_DATA\_(MIN) = 60

END\_METEO\_DATA\_(HOURS\_AFTER\_00) = 48

ERUPTION\_START\_(HOURS\_AFTER\_00) = 0 12

ERUPTION\_END\_(HOURS\_AFTER\_00) = 24

RUN\_END\_(HOURS\_AFTER\_00) = 30

RESTART = NO

Fecha de simulación. **TODOS** los tiempos se refieren a las **00UTC** de este día

Intervalo de tiempo de la base de datos. En este ejemplo SetDbs generará una dbs desde 29-04-08 a las 00UTC hasta 01-05-08 a las 00UTC.

Intervalos del término fuente y duración de la erupción. En este ejemplo hay 2 intervalos (0,12) y (12-24). La simulación continua incluso sin término fuente (la ceniza tiene que caer!).

Indica si la simulación es re-start o no

El intervalo de la base de datos (0h-48h en el ejemplo) tiene que contener el intervalo de la simulación (0h-30h en el ejemplo).

Estos son **ndt intervalos** durante los cuales MFR (o la altura H) son constantes. Esto permite, en práctica, discretizar cualquier tipo de término fuente con dependencia temporal.

Solo se usa para LON-LAT

## GRID

COORDINATES = LON-LAT

Puede ser **LON-LAT** o **UTM**

LON\_LAT

LONMIN = 14.0

LONMAX = 16.0

LATMIN = 36.5

LATMAX = 38.5

LON\_VENT = 15.10

LAT\_VENT = 37.75

UTM

UTMZONE = 33S

XMIN = 400000.

XMAX = 600000.

YMIN = 4075000.

YMAX = 4275000.

X\_VENT = 500000.

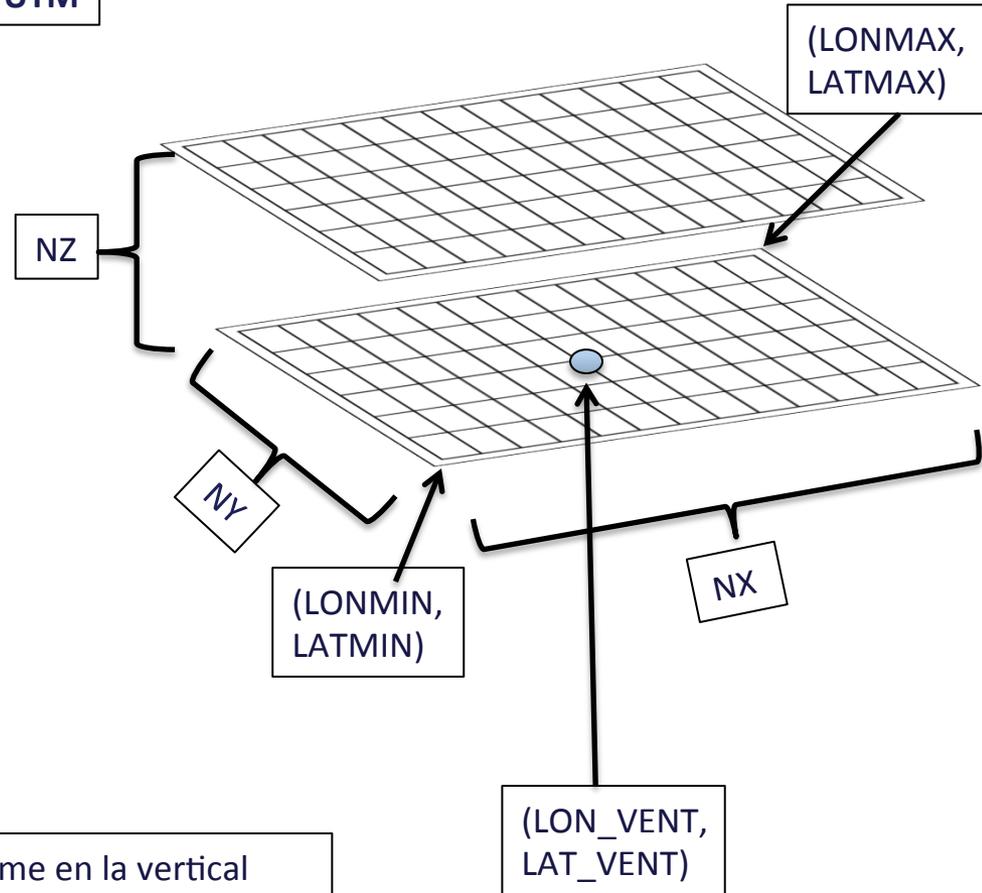
Y\_VENT = 4177000.

NX = 51

NY = 51

ZLAYER\_(M) FROM 0. TO 8000. INCREMENT 500.

Esto genera una malla uniforme en la vertical con 17 capas. Discretización no uniforme en vertical es también posible. Para ello hay que dar la lista de alturas.



Las coordenadas del vent no tienen porque coincidir con un nodo

Modelo de velocidad terminal. Las posibilidades son: ARASTOOPOUR, GANSER, WILSON y DELLINO.

## FALL3D

TERMINAL\_VELOCITY\_MODEL = ganser  
VERTICAL\_TURBULENCE\_MODEL = CONSTANT  
VERTICAL\_DIFFUSION\_COEFFICIENT\_(M2/S) = 500.  
HORIZONTAL\_TURBULENCE\_MODEL = RAMS  
HORIZONTAL\_DIFFUSION\_COEFFICIENT\_(M2/S) = 5000.

Difusión vertical  $K_V$ . Las posibilidades son CONSTANT o SIMILARITY

Valor de  $K_V$  para el caso CONSTANT

Difusión horizontal  $K_H$ . Las posibilidades son CONSTANT, CMAQ o RAMS

Valor de  $K_H$  para el caso CONSTANT

## OUTPUT

POSTPROCESS\_TIME\_INTERVAL\_(HOURS) = 1.  
POSTPROCESS\_3D\_VARIABLES = YES  
POSTPROCESS\_CLASSES = NO  
TRACK\_POINTS = YES

intervalo salida resultados (output en *nombre.res.nc*).

Para el caso YES saca variables 3D (concentración total y de cada clase en el aire).

Para el caso YES saca los resultados para cada clase.

Para el caso YES escribe los ficheros de tracking. Habrá un fichero de salida para cada punto definido en el fichero *nombre.pts*.

## SOURCE

## GRANULOMETRY

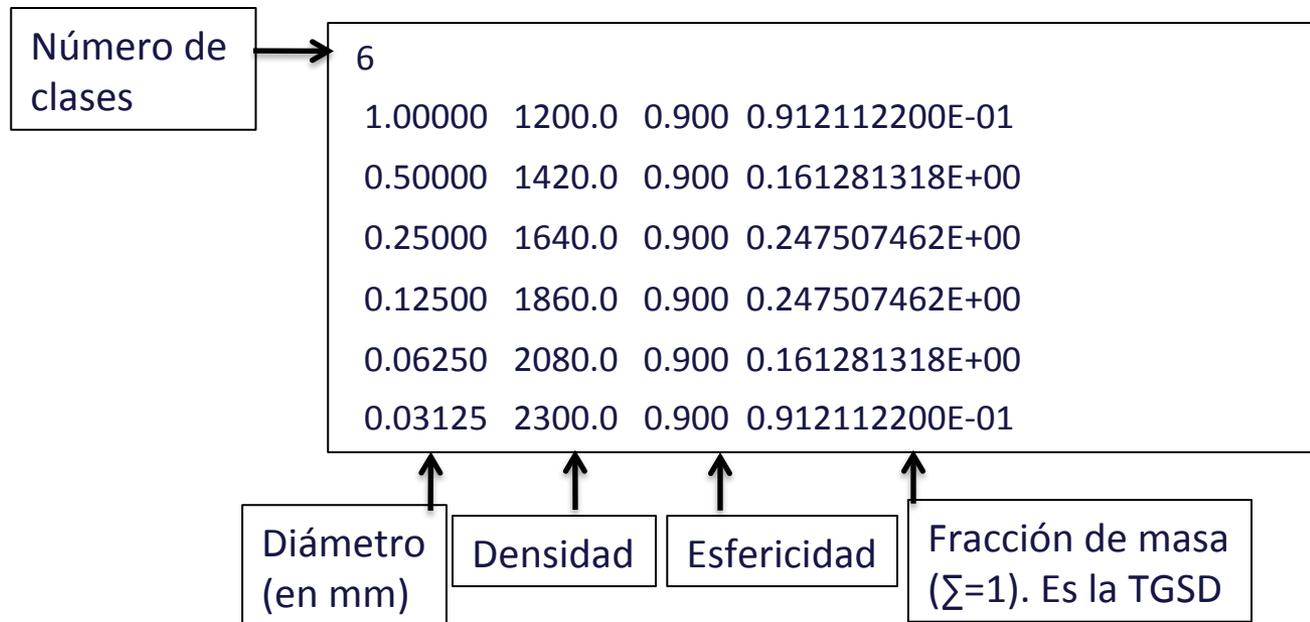
## POSTPROCESS

Estos bloques se explica más adelante.

## 2. Fichero *nombre.grn*

- o Fichero de granulometría en formato ASCII.
- o Define las propiedades de cada clase y la distribución total (TGSD).
- o Se puede generar mediante el programa **SetGrn** (alternativamente, el usuario puede darlo directamente). Típicamente obtenido mediante estudios de campo.

**Ejemplo** de un fichero para 6 clases de partículas desde 1mm ( $\phi=0$ ) hasta 31 $\mu\text{m}$  ( $\phi=5$ )



### 3. Fichero *nombre.dbs.nc*

- o Base de datos en formato netCDF.
- o Contiene datos meteorológicos 4D (de forecast or re-analysis) para un intervalo de tiempo que incluye el intervalo de la simulación.
- o El paso de tiempo está definido pero el usuario (típicamente 1h).
- o Los valores se dan en cada nodo de la malla de Fall3d. Por lo tanto, si cambiamos el dominio (o la resolución del mismo) habrá que generar el fichero de nuevo.
- o Se genera mediante la programa **SetDbs** (abreviatura de Set DataBase).
- o Se puede usar software libre para verlo (por ejemplo *ncview* y *ncdump* ).

### 4. Fichero *nombre.src*

- o Fichero en formato ASCII que especifica el término fuente (columna eruptiva).
- o Da la masa por unidad de tiempo en cada nodo de la columna y para cada clase granulométrica. Por lo tanto, depende de la granulometría y de la malla que usemos.
- o Organizado por bloques. Hay un bloque para cada intervalo de tiempo (ndts).
- o Se puede generar mediante el programa **SetSrc** (Set Source).

**Ejemplo** de un fichero fuente para 3 clases de partículas y un solo intervalo de tiempo de 24h (86400s)

Intervalo de tiempo (medido en segundos después de 00:00UTC del día en curso)

0 86400

Numero de nodos con término fuente y número de clases

8 3

MFR (kg/s) para este intervalo de tiempo

0.100000000E+07

|           |           |       |                 |                 |                 |
|-----------|-----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 15.080000 | 37.740000 | 5000. | 0.518470119E+05 | 0.152557777E+06 | 0.518470119E+05 |
| 15.080000 | 37.780000 | 5000. | 0.166738517E+05 | 0.490621476E+05 | 0.166738517E+05 |
| 15.080000 | 37.740000 | 5500. | 0.240261309E+05 | 0.706959376E+05 | 0.240261309E+05 |
| 15.120000 | 37.740000 | 5500. | 0.527108377E+05 | 0.155099550E+06 | 0.527108377E+05 |
| 15.080000 | 37.780000 | 5500. | 0.861719588E+04 | 0.253557572E+05 | 0.861719588E+04 |
| 15.120000 | 37.780000 | 5500. | 0.197125131E+05 | 0.580032881E+05 | 0.197125131E+05 |
| 15.120000 | 37.740000 | 6000. | 0.231623052E+05 | 0.681541646E+05 | 0.231623052E+05 |
| 15.120000 | 37.780000 | 6000. | 0.557853455E+04 | 0.164146167E+05 | 0.557853455E+04 |

Hay que repetir este bloque para cada intervalo

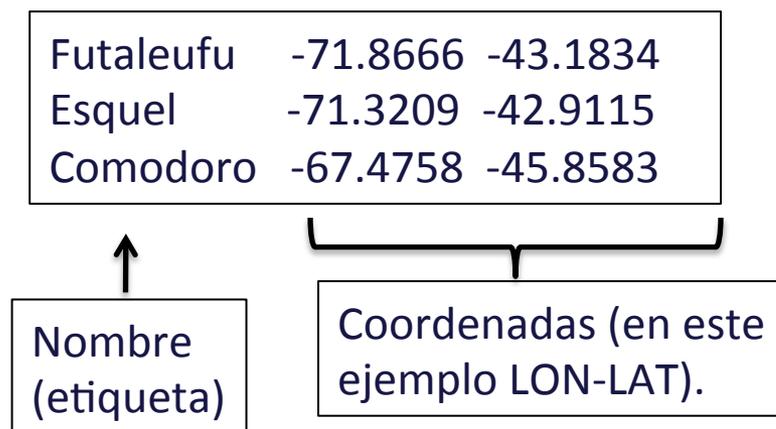
Coordenadas de los (8) nodos.  
En este ejemplo LON-LAT-Z. La  
coordenada vertical en "terrain-following"

MFR (kg/s) para cada clase y nodo(  $\sum \Sigma = \text{MFR}$ )

## 5. Fichero *nombre.pts*

- o Fichero ASCII (opcional) que contiene una lista de puntos de interés particular.
- o Lo usa Fall3d para seguir la evolución de variables en los puntos especificados.
- o También lo pueden usar algunos programas de postproceso para dibujar estos puntos en los mapas.

**Ejemplo** de un fichero de puntos (por simplicidad se muestran solo 3 puntos).



## 1. Fichero *nombre.res.nc*

- o Fichero de resultados de Fall3d en formato netCDF (nc).
- o Contiene valores de variables en los nodos para distintos instantes de tiempo:

### variables 2D

Topografía

Carga total en el suelo (kg/m<sup>2</sup>).

Carga de cada clase (kg/m<sup>2</sup>).



Solo existe si POSTPROCESS\_CLASSES = YES en el fichero de control *nombre.inp*

Espesor del depósito (cm).

Concentración acumulada en vertical (gr/m<sup>2</sup>=Tn/km<sup>2</sup>).

Concentración en FL100/200/300 (gr/m<sup>2</sup>).

Concentración de PM<sub>10</sub> en la primera capa (gr/m<sup>3</sup>).

### variables 3D

Concentración total en el aire (gr/m<sup>3</sup>).

Concentración de cada clase (gr/m<sup>3</sup>).



Solo existen si POSTPROCESS\_3D\_VARIABLES= YES y POSTPROCESS\_CLASSES = YES en el fichero de control *nombre.inp*

- o El fichero (binario) se puede ver con muchos programas, como *ncview* o *ncl*.

## 2. Fichero *nombre.tps.lugar.res*

- o Fichero ASCII con la evolución temporal de las variables.
- o Hay un fichero de salida para cada lugar especificado en el fichero de puntos *nombre.pts*
- o Los ficheros se generan solo si TRACK\_POINTS= YES en el fichero de control.

**Ejemplo** de un fichero *nombre.tps.Esquel.res* (ver el ejemplo de *nombre.pts*).

Tracking point file for : Esquel

Coordinates : -71.3209 -42.9115

| Time  | DDMMM-HH:MM | load    | thickness | cummul  | flevels |  |  |
|-------|-------------|---------|-----------|---------|---------|--|--|
| (min) | (--)        | (kg/m2) | (cm)      | (gr/m2) | (gr/m3) |  |  |

---

|     |             |              |              |              |              |              |              |
|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 600 | 02MAY-10:00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 660 | 02MAY-11:00 | 0.171175E-05 | 0.733379E-07 | 0.399118E+00 | 0.543219E-05 | 0.162980E-04 | 0.138735E-05 |
| 720 | 02MAY-12:00 | 0.496875E-02 | 0.207094E-03 | 0.497653E+02 | 0.314864E-02 | 0.650543E-02 | 0.140016E-03 |

Time.

Deposit load and  
thickness.

Cumulative  
concentration.

Concentration at flight levels.

## 3. Fichero *nombre.tps.lugar.final.res*

- o Fichero ASCII con el deposito final y la granulometría en los lugares seleccionados.
- o Hay un fichero para cada lugar especificado en el fichero de puntos *nombre.pts*
- o Los ficheros se generan solo si TRACK\_POINTS= YES en el fichero de control.

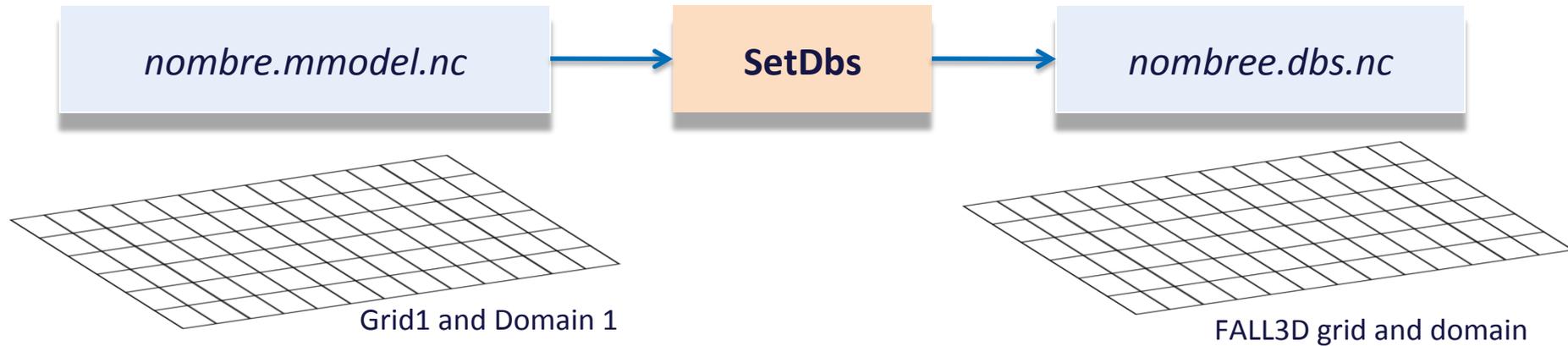
**Ejemplo** de un fichero *nombre.tps.Esquel.final.res* (ver el ejemplo de *nombre.pts*).

```
Deposit file for : Esquel
Coordinates : -71.3209 -42.9115
Diameter fi load fraction
(mm) (--) (kg/m2) (%)

16.0000 -4.00 0.665601E-11 0.0000
8.0000 -3.00 0.140556E-08 0.0000
4.0000 -2.00 0.193122E-06 0.0000
2.0000 -1.00 0.175984E-04 0.0000
1.0000 0.00 0.303508E-02 0.0045
0.5000 1.00 0.954931E+00 1.4055
0.2500 2.00 0.512955E+02 75.4964
0.1250 3.00 0.155007E+02 22.8138
0.0625 4.00 0.156043E+00 0.2297
0.0312 5.00 0.340925E-01 0.0502
```

## 1. El programa SetDbs

- o Construye la base de datos para **Fall3d** interpolando las salidas de modelos meteorológicos globales, mesoescalares, locales (CALMET) o perfiles verticales.



- o La versión PROF contempla GFS, WRF, ETA, ARPASIM, NCEP-1/2, CALMET, o perfil.
- o **SetDbs** se debe ejecutar cada vez que la meteorología o la malla de Fall3d cambian.
- o La base de datos contiene:  
XLON, XLAT, TOPG, LDU, PBLH, U\*, L  
U, V, W, T, TP, P, QV, RHO

## 2. El programa *SetGrn*

- o Este programa genera el fichero de granulometría *nombre.grn* para dos casos:
  - 1) Distribución **Gausiana** en  $\Phi$  (log-normal en d).
  - 2) Distribución **bi-Gausiana** en  $\Phi$  (tiene en cuenta dos modos).
- o Para otras distribuciones, el fichero también lo puede proporcionar el usuario directamente (como típicamente ocurre en eventos pasados).
- o Se configura en el bloque **GRANULOMETRY** del fichero de control (in terms of  $\Phi$ ).

### GRANULOMETRY

DISTRIBUTION = GAUSSIAN

NUMBER\_OF\_CLASSES = 6

FI\_MEAN = 2.5

FI\_DISP = 1.5

FI\_RANGE = 2. 7.

DENSITY\_RANGE = 1200 2300

SPHERICITY\_RANGE = 0.9 0.9

← Las posibilidades son GAUSSIAN o BIGAUSSIAN.

} La Gausiana la definen dos valores:  $\Phi_{\text{mean}}$  y  $\sigma$ . Para el caso bi-gausiano hay que dar dos valores para cada parámetro.

← valores mínimo y máximo de  $\Phi$ .

} Rango de variación (lineal) de la densidad y esfericidad. Los límites corresponden a  $\Phi_{\text{min}}$  y  $\Phi_{\text{max}}$  respectivamente.

## 3. El programa SetSrc

- o Genera el fichero de fuente *nombre.src* para 3 casos particulares: fuente **puntual**, distribución de **Suzuki** y **Plume** dada la altura H (solución por iteración ) o el MFR.
- o Para el caso PLUME, hay dependencia con las variables meteorológicas.
- o Se configure en el bloque **SOURCE** del fichero de control.

