

Algoritmo probabilístico para la simulación de flujos de lavas

MASTER OFICIAL EN SISTEMAS INTELIGENTES Y APLICACIONES NUMÉRICAS EN
INGENIERÍA

José María Morales de Francisco

Contenido

1.- Introducción	3
2.- Objetivos del proyecto.	4
2.1.- Objetivo 1.	4
2.2.- Objetivo 2.	4
3.- Estado del arte	5
3.1.- Modelos determinísticos.	5
3.2.- Modelos probabilísticos.	7
4.- Elección del algoritmo.	8
4.1.- Desarrollo teórico de un modelo probabilístico.	8
5.- Fundamentos teóricos y desarrollo.	11
5.1.- Fundamento teórico.	11
5.1.1.- Algoritmo de exploración.	11
5.1.2.- Optimización de matrices	15
5.2.- Desarrollo del algoritmo.	15
BLOQUE I. Carga del MDE, <i>inputs</i> y recorte.	16
BLOQUE II. Algoritmo de cebado.	17
BLOQUE III. Algoritmo de dirección más frecuente.	18
BLOQUE IV. Salida de datos	23
5.3.- Validación	23
5.3.1.- Escenarios simulados.	24
5.3.2.- Escenario real	30
6.- Conclusiones y líneas futuras de mejora	34
7. - Bibliografía.	35

1.- Introducción

El impacto potencial de un peligro natural como el volcanismo, especialmente en Canarias, depende de la relación que existe entre éste y la población o los bienes que se encuentran expuestos al mismo. Así, las consecuencias de una erupción volcánica dependen en primer lugar de los fenómenos físicos que se desarrollan durante la misma (ej. coladas de lava, caída de cenizas, deslizamientos, tsunamis) y de la magnitud, distribución y frecuencia que éstos alcanzan (peligrosidad) y en segundo lugar de la vulnerabilidad de las personas y los bienes frente a estos fenómenos. Aunque conceptualmente resulta simple entender cuáles son los componentes del riesgo, a efectos prácticos su estimación resulta bastante compleja

A pesar de los esfuerzos dedicados a analizar los fenómenos volcánicos en las últimas décadas, hasta la fecha no se dispone de mapas de riesgos publicados para ninguna región volcánica activa a pesar de que, existe una base metodológica suficiente para llevar a cabo este tipo de estudios, la cual se ha aplicado ya ampliamente para analizar otros riesgos naturales. El motivo fundamental que ha dado lugar a esta situación es la complejidad que reviste el análisis del fenómeno volcánico en comparación con otros peligros y la escasez de datos de que se dispone en muchas ocasiones lo que dificulta la construcción de los modelos de datos.

En general, la modelización física de erupciones volcánicas implica un gran número de procesos acerca de la generación de magma, su ascenso a través de la Litosfera, que requieren el análisis de ecuaciones de continuidad, ecuación de energía y cantidad de movimiento. Esta evidente complejidad plantea diversos problemas como la dificultad en la resolución numérica de ecuaciones de Navier-Stokes, que obliga a simplificaciones en los sistemas de ecuaciones y la imposibilidad de enlazar todos los sistemas con objeto de darle continuidad al proceso volcánico.

Uno de los fenómenos que más cambios ocasionan en la orografía de la superficie terrestre son los fenómenos volcánicos. Los eventos volcánicos se caracterizan por producir un cambio orográfico sustancial en las zonas donde se forman. En todo evento volcánico, se originan un elevado número y tipo de productos volcánicos lo cuales son generadores de relieve positivos modificando la fisiografía local y regional. Ésta generación se presenta a través del depósito de materiales de distinta reología, en general con elevada temperatura y en un estado multifase.

A esta complejidad hay que añadir su distribución espacial, que abarca desde decenas de metros hasta miles de kilómetros y, temporal, con tiempos variables de milisegundos a años. Por otro lado, la escala temporal de estos fenómenos es tiene ordenes de magnitud, enormes con fenómenos volcánicos como las explosiones volcánicas que se inician en milisegundos y otros como la emisión de piroclastos o lavas diferirse en el tiempo durante años.

En los últimos veinte años la modelización numérica de los procesos volcánicos se ha convertido en una de las líneas de investigación punteras en la Volcanología, puesto que constituye una herramienta esencial no sólo para cuantificar diversos procesos volcánicos, sino para comprender cómo y por qué tienen lugar estos procesos.

En la actualidad, el gran reto de los modelos numéricos sigue siendo la optimización del software para la disminución de los tiempos de ejecución de las simulaciones y el uso de modelos cada vez más complejos que simulan mejor la realidad.

2.- Objetivos del proyecto.

El proyecto consiste en desarrollar un algoritmo que permita simular un proceso de distribución de un flujo lávico desde un centro de emisión. Este algoritmo se validará en una zona piloto de la isla de El Hierro (Islas Canarias) al tratarse de la isla con la actividad volcánica más reciente (octubre de 2011) y tener datos recientes sobre la geología de la misma.

2.1.- Objetivo 1.

Desarrollar un algoritmo que simule un único flujo de lava que permita:

- Crear una nueva topografía a partir del depósito de la lava.
- Distribución espacial de los espesores de lava.

2.2.- Objetivo 2.

Implantar un algoritmo que permita ser utilizado durante una crisis volcánica por los servicios de Protección Civil como la erupción acontecida en la isla de El Hierro en el año 2011.

Para este objetivo será necesario:

- Un algoritmo «ágil» que permita ser ejecutado en un computador tipo escritorio sin grandes costes en *hardware*.
- Los datos de entrada limitados y disponibles por parte de Protección Civil de manera que puedan realizarse varios escenarios en función de los posibles puntos de apertura y volumen de expulsión de fluido lávico.
- Integración con *software* que permita interpretar los datos y ser fácilmente transferidos entre diferentes plataformas.

3.- Estado del arte.

La lava es un fluido de composición silicatada y en estado multifásico que fluye por gravedad sobre la superficie terrestre. La temperatura de emisión de una lava básica es del orden de 1000 – 1100°C y se va enfriando a medida que discurre por la superficie. Su enfriamiento es básicamente por radiación aunque juega un papel importante la convección del propio fluido. La naturaleza silicatada, la inclusión de gases en la mezcla lávica y los sólidos cristalizados favorecen que se produzcan fuertes diferencias en su enfriamiento, dando un producto final con características complejas en cuanto a su cinemática y reología. La temperatura de emisión así como la composición condiciona la viscosidad y por tanto el movimiento de la colada por la superficie terrestre. La temperatura y la composición son los elementos clave a la hora de modelizar un flujo lávico así como la tasa de emisión durante el evento volcánico. El motor del movimiento de la lava sobre la superficie es la gravedad, por lo que el flujo a través de la pendiente es un factor que tiene que incluirse en el algoritmo.

La modelización numérica de flujos lávicos es tradicionalmente una modelización compleja ya que implica la discretización de un material fluido de reología no newtoniana, lo que complica enormemente su modelización. Además, la determinación los parámetros que gobiernan estas ecuaciones no son sencillos de obtener al ser necesario experimentación en laboratorio para obtener sus características reológicas.

Tradicionalmente los métodos de modelización numérica en lavas [1] se han clasificado en dos tipos:

3.1.- Modelos determinísticos.

Los modelos determinísticos se basan en la modelización de la teoría del transporte mediante ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa, momento y el balance energía. Las ecuaciones resultantes (ecuaciones de Navier-Stokes) son altamente no lineales y su solución tiene un elevado coste computacional. Además, la ausencia de condiciones de contorno, la superficie libre y la pérdida de energía por radiación añaden una dificultad extraordinaria.

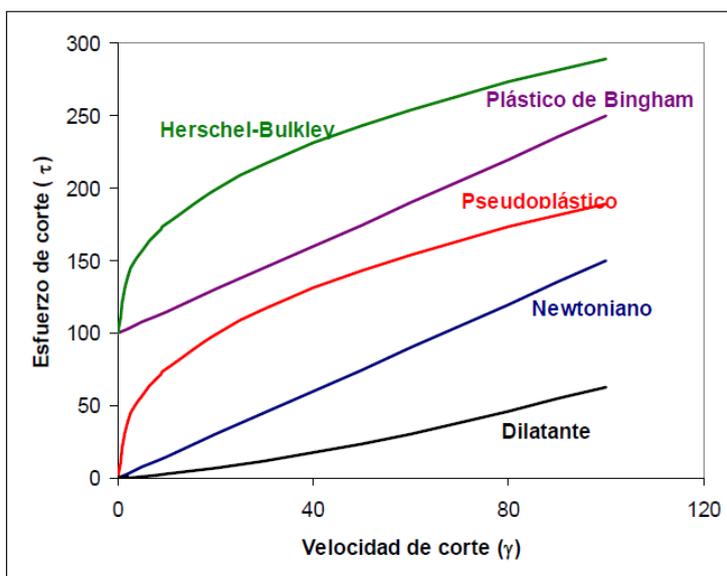


Figura 1. Representación de esfuerzo cortante vs. velocidad de corte para tipos de fluidos.

Actualmente, la mayoría de los modelos computacionales asumen que la lava se comporta como un modelo Bingham (Figura 1) simplificando los modelos. Otra de los problemas son los *inputs* o datos de entrada pues su obtención es compleja (emisividad, calor específico, composición, temperatura de *solidus* y *liquidus*, tensión de cizalla,...). Tienen la ventaja de obtener una aproximación espacial-temporal de la distribución de la lava.

Algunos de los modelos determinísticos hallados en la literatura son los siguientes:

- **FLOWFRONT** [2]. Simula únicamente el frente del flujo de lava considerándolo como un fluido Bingham mientras que el espesor de la lava es lo suficientemente grande para que el esfuerzo cortante supere el módulo elástico en esa pendiente. La ventaja de este método es el bajo coste computacional aunque no tiene en cuenta el cambio del esfuerzo cortante con la temperatura. En modelo están implementado en lenguaje C
- **Modelo Barca** [3] [4]. Se basa en un modelo de autómatas celulares en los que el espacio se discretiza en celdas cuadradas y la transferencia del volumen y temperatura de la lava de una celda a las celdas vecinas, se controlada por reglas fijadas. El autómata celular se detiene cuándo se alcanza la temperatura crítica de solidificación. Se han propuesto modelos bidimensionales y tridimensionales.
- **LAVASIM** [5]. LavaSIM utiliza un novedoso modelo de dinámica de fluidos que considera convección en tres dimensiones, la difusión y la solidificación, dependiente de la temperatura-viscosidad del magma y la mínima extensión del espesor. Este modelo además añade la interface de escoria y fluido. El criterio de parada está fijado en la mínima extensión del espesor donde el cortante es no nulo. Este modelo implementado en Fortran tiene un alto coste computacional, validado en una lava del Monte Fuji.
- **MAGFLOW** [6]. Modelo basado en Autómatas Celulares similar al Modelo Barca [3] transfiriendo el calor y el espesor de una celda a las celdas vecinas, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes considerando un fluido tipo Bingham. La simetría de la malla en la discretización del espacio genera problemas de simetría axial afectando a la extensión del fluido. Por esta razón, recurre a un Algoritmo de Monte Carlo que permite la selección de las celdas vecinas a las que se propaga eliminando así este problema. Este modelo ha sido validado en numerosas coladas en el Monte Etna.
- **Modelo Miyamoto** [7]. El modelo numérico basado en la utilización de autómatas celulares utiliza la ecuación de Navier-Stokes sobre una malla de celdas hexagonales. La malla de celdas hexagonales elimina la simetría axial que muestra una malla de celdas cuadradas. Para el desplazamiento del flujo lávico, se realiza una distribución aleatoria de puntos sobre la malla y se define un círculo de radio determinado, de modo que la probabilidad de que un punto esté dentro del círculo hará que el flujo de lava se desplace a cada celda adyacente con mayor probabilidad.

- **FLOWGO** [8]. Es un modelo numérico autoadaptivo de la lava fluyendo dentro de un canal de lava. La base del modelo es la estimación de la velocidad de lava como un fluido Bingham dentro de un canal. Durante cada paso de la simulación, se calculan las pérdidas y ganancias de calor para determinar sus efectos sobre la reología de la lava. La lava se parará cuando alcance la temperatura *solidus* o alcance velocidad nula. Modelo validado en un campo de lava en el *Mauna Loa* (Hawaii).

3.2.- Modelos probabilísticos.

Los modelos probabilísticos basados en el modelo de Macedonio [9] asumen que la topografía juega el mayor papel en el control de la traza de la lava e identifican las zonas potencialmente invadidas por lava y calculan la probabilidad de la invasión usando un algoritmo de Monte Carlo. El flujo se propaga a lo largo de trayectorias aleatorias desde un punto de emisión sobre un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) siguiendo unas reglas de propagación. Las trayectorias no pueden propagarse hacia arriba ni rellenar áreas deprimidas.

Los modelos probabilísticos son de bajo coste computacional y a resaltar también de escasos datos de entrada. Algunos de los modelos estudiados son los siguientes:

- **VORIS** [10]. Modelo fundamentado en el Modelo de Macedonio [9] determina en base al número de veces que el algoritmo pasa por cualquier celda, la probabilidad de cubrición por un flujo lávico. Entre datos de entrada, son necesarios las coordenadas del punto de emisión, longitud prevista de la colada y su espesor medio. Este modelo destaca por su escaso coste computacional y la disponibilidad de su algoritmo. Este modelo implementado en C++ ha sido validado en el Monte Etna.
- **DOWNFLOW** [11]. Está basado en un modelo numérico que realiza aproximaciones estocásticas para estimar áreas de inundación de lava. Se basa en el control de la pendiente del terreno por el que discurre el flujo y utiliza la perturbación estocástica de la topografía para la decisión de flujo. Este modelo ha sido validado en el Monte Etna aunque no está disponible el código fuente.
- **ELFM** [12]. *Etna Lava Flow Model* (ELFM) es un algoritmo basado en el Modelo de Macedonio [9], al cual se le ha añadido modificaciones como el Modelo Digital de Elevación Dinámico que permite asignar espesores a la lava a lo largo de cada iteración y evitar que la lava pueda pasar más de una vez por su propia trayectoria. Se ha validado en el Monte Etna y no está disponible el código fuente.
- **Modelo Connor** [13]. Este modelo basado en el algoritmo de máxima pendiente realiza una simulación de Monte Carlo dado un volumen de lava. El modelo al ejecutarse va «repartiendo» parte del volumen en cada celda a lo largo de su trayectoria. Una vez ha repartido todo el volumen en la simulación, se para el algoritmo. Aunque el algoritmo está publicado e implementado en PERL no está validado.

4.- Elección del algoritmo.

La elección del tipo de modelo de simulación va a estar condicionada por los datos de entrada al modelo que, en el caso particular del Archipiélago Canario, los datos como la viscosidad, temperatura de *solidus*, valor del cortante, etc... para los tipos petrológicos más frecuentes en Canarias, no se ha hallado en la literatura. La escasez de experimentación en reología de rocas volcánicas canarias, la ausencia de predicción de la petrología de futuras erupciones o los niveles freáticos que pueden variar los datos reológicos hace inviable el uso de modelos determinísticos.

Los modelos probabilísticos únicamente necesitan un Modelo Digital de Elevaciones sin necesidad de las características reológicas de las lavas lo que ha condicionado que el modelo elegido sea de tipo probabilístico para su desarrollo y validación.

4.1.- Desarrollo teórico de un modelo probabilístico.

Los modelos probabilísticos estudiados en el apartado 3.2 se van a utilizar como modelos para el desarrollo teórico de un nuevo modelo probabilístico. En la literatura son escasos los códigos de programación publicados [7, 14, 13] y el único modelo probabilístico validado disponible se adaptó para una *toolbox* conocida como VORIS [10] (*Volcanic Risk*) para el Sistema de Información Geográfica (ArcGis®). VORIS servirá como base para la verificación y comparación de un nuevo diseño del modelo probabilístico que se va a detallar a continuación.

VORIS

VORIS es una *toolbox* independiente diseñada para la aplicación ArcGis® cuyo objetivo es la simulación probabilística de flujos lávicos. Para su uso, es necesario tener cargada en la aplicación ArcGis® un fichero del Modelo Digital de Elevación (MDE) que consta de tres matrices (X, Y, Z) con coordenadas georreferenciadas y elevaciones topográficas en proyección UTM.

La *toolbox* de simulación de lavas únicamente posee una GUI (Interface gráfica) en el que los *input* a introducir (Figura 2) son los siguientes:

- Topografía. El Modelo Digital de Elevación.
- Longitud máxima del flujo.
- Altura de corrección. Altura de colada.
- Número de iteraciones.
- Coordenadas espaciales del centro de emisión (*Vent*).

Una vez se pulsa el botón de *Run*, comienza el algoritmo desde el centro de emisión (*vent*) determinado por el usuario y que queda dentro del MDE. Desde este punto (Figura 3) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con altura h_0 , el flujo puede dirigirse a una de las ocho celdas circundantes (h_i). La probabilidad de que el flujo se desplace a cada celda es proporcional a la diferencia de alturas topográficas entre la celda objetivo y aquella donde se encuentra el flujo. Si la diferencia es positiva la lava no se propagará (es decir, el flujo no puede propagarse contra pendiente) y si es negativa el flujo se propagará. El factor (h_c) denominado «corrección de altura» simula el espesor de la colada que se añade al valor de la altura topográfica y se suma altura h_0 [Ecuaciones 1 y 2]

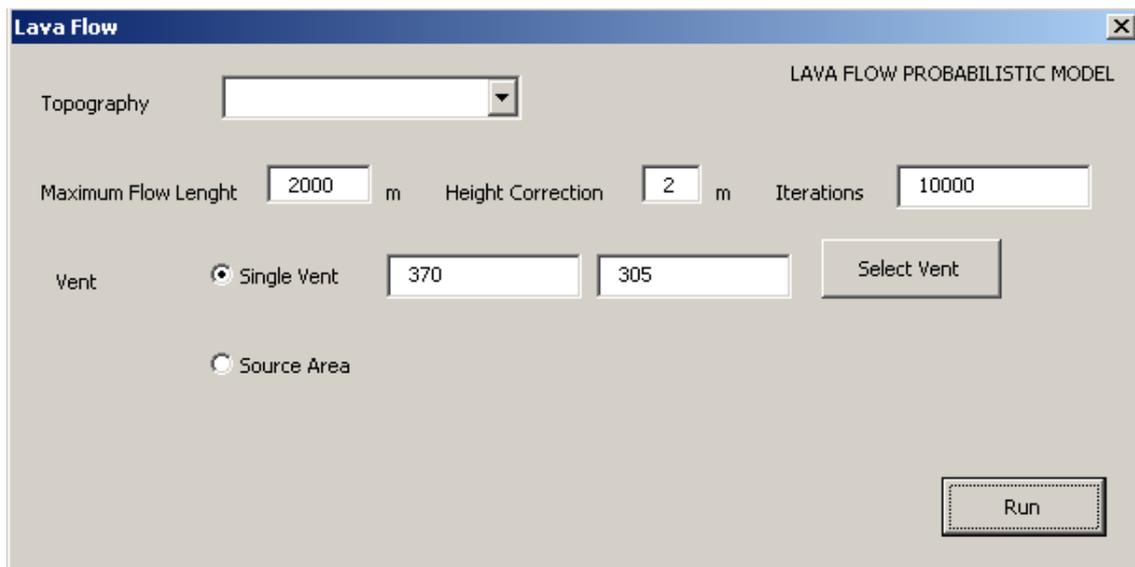


Figura 2. Pantalla de introducción de datos en el modelo probabilístico de lavas (VORIS).

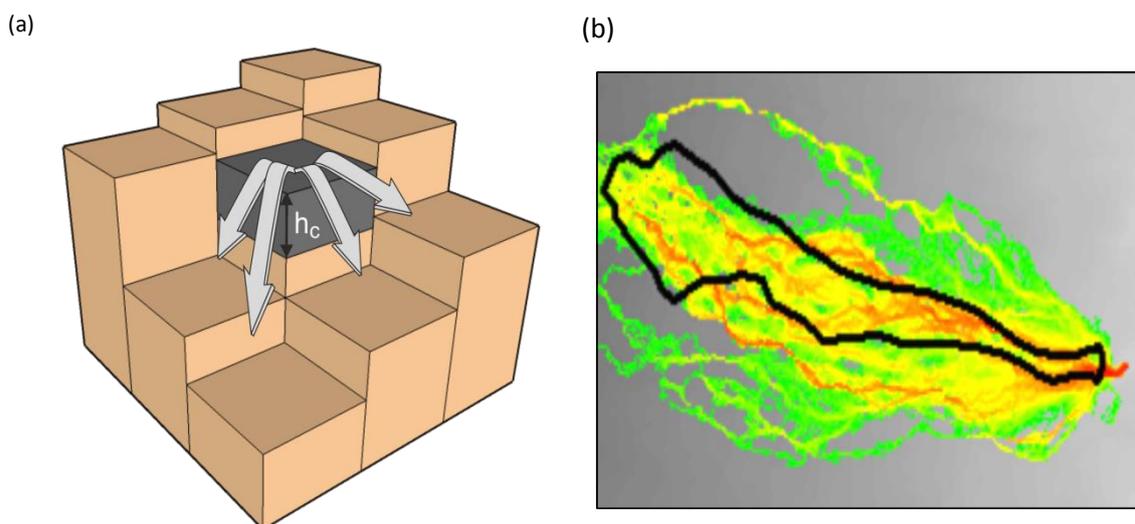


Figura 3. (a) Distribución de la colada con su espesor (h_c) a las celdas vecinas. (b) Ejemplo de simulación mediante modelo VORIS. Probabilidad máxima (roja), mínima (verde) y borde de la colada real (negro).

$$P_1 = \frac{\Delta h_1}{\sum_{i=1}^8 \Delta h_i} \quad i = 1,2 \dots 8 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_i &= h_0 - h_i & \text{si } (h_0 + h_c - h_i) &\geq 0 \\ \Delta h_i &= 0 & \text{si } (h_0 + h_c - h_i) &< 0 \end{aligned} \quad (2)$$

La selección de la celda a la que se propagará el flujo se realiza mediante un algoritmo de MonteCarlo, en el que se utiliza un número aleatorio entre 0 y 1 (Eq. 3)

$$S_{i-1} \leq n_{rand} < S_i \quad (3)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^i P_j \quad i = 1, 2 \dots 8$$

Este algoritmo se repite iterativamente un número de veces definido por la longitud del flujo. La longitud del flujo tiene doble objetivo por un lado acotar el alcance de la lava y por otro para el algoritmo en caso que el flujo caiga dentro de una zona deprimida ya que el algoritmo de VORIS no puede transitar en zonas hundidas o llanas.

Finalmente, todo el algoritmo se repite desde el inicio, un número de iteraciones predefinidas en el *input*. Para calcular la probabilidad de que una zona sea invadida o no por una lava se hace un recuento de cuántas veces es atravesada cada celda en cada iteración. Las celdas que han sido atravesadas muchas veces serán las que tienen una mayor probabilidad de ser invadidas, mientras que las que han sido atravesadas un menor número de veces tienen una probabilidad menor (Figura 3b).

El algoritmo tiene una pequeña función que permite en caso de quedar atrapada la lava en una pequeña depresión, evaluar las 24 celdas alrededor de la principal (Figura 4). Si alguna de ellas tiene una altura inferior a la h_0 , la lava se propagará a esa celda. En caso contrario, el algoritmo se detendrá.

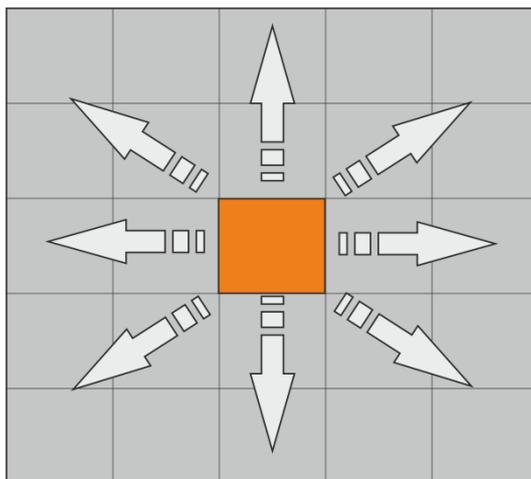


Figura 4. Evaluación de las 24 celdas alrededor de la celda h_0

5.- Fundamentos teóricos y desarrollo.

El desarrollo de un nuevo modelo probabilístico se basa en simular algunos elementos determinísticos como la distribución del volumen de lava, reparto de espesores de lava, alcance de la lava y la probabilidad de cubrición de una superficie. Otros aspectos relacionados con las limitaciones de los algoritmos actuales como los rellenos de depresiones y el tránsito de lavas por zonas llanas y la gestión del *hardware* para la optimización de memoria y coste computacional serán resueltos.

5.1.- Fundamento teórico.

El planteamiento de un nuevo modelo de probabilístico se va a centrar en la resolución de los problemas clásicos del «A. de máxima pendiente» añadiendo la volumetría en la simulación y la optimización de matrices.

5.1.1.- Algoritmo de exploración.

Los problemas conocidos del «A. de máxima pendiente» son la imposibilidad de transitar en zonas planas, imposibilidad de rellenar depresiones. Algunos algoritmos, tienen una longitud de flujo preestablecida [10], simetría axial en el mallado [13] o simulación del volumen de lava [12]. El objetivo es unificar todo estas características y resolver el tránsito por zonas planas y depresiones Se van a abordar las problemáticas en varios pasos:

Vecindad de Moore extendido.

El modelo probabilístico VORIS calcula la distancia de una celda a otra utilizando el concepto de entorno de una célula que aplica en el Juego de la Vida [15]. En este Autómata Celular se pueden programar varios modelos de vecindad: Von Neumann, Moore, Moore extendido y Margolus. El utilizado en VORIS y otros algoritmos probabilísticos es un modelo de Vecindad de Moore (Figura 5b) donde las diagonales son distintas de las celdas N,S,E,W calculándose mediante una distancia euclídea. Sin embargo, esto genera una fuerte asimetría en la solución cuando la orientación de MDE no coincide con la orientación del flujo. Para evitar esta polarización en direcciones, se ha decidido emplear un entorno de Moore extendido calculando las distancias mediante distancia Chebyshev (Figura 5c).

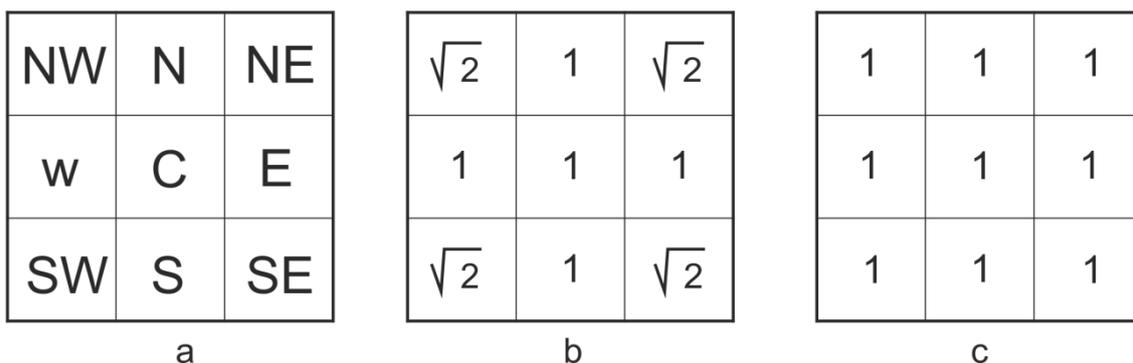


Figura 5. a) Orientación de las celdas. Valores de la distancia b) entornos de Moore y c) entornos de Moore extendidos.

Algoritmo de dirección más frecuente.

El algoritmo que gobierna a los modelos probabilísticos es el de «máxima pendiente» donde por heurística se asume que la colada de lava discurre por las zonas de máxima

pendiente. No obstante, la elevada viscosidad hace que se transmita por zonas de pendiente menor. Para simular este efecto se realiza una poda selectiva de las ramas utilizando un Algoritmo de MonteCarlo donde la “diferencia de altura” entre el nodo padre e hijo implica mayor probabilidad que la lava discurra por una determinada rama y aplicando el A. de MonteCarlo.

Este algoritmo tiene gran analogía con el algoritmo de búsqueda informado utilizado en Inteligencia Artificial denominado “Búsqueda en Escalada” (*Hill climbing*) [16]. Este algoritmo busca en una zona el punto más elevado siendo muy eficiente en su cometido. Los problemas conocidos de este algoritmo es que la búsqueda no es óptima y la solución puede presentar máximos locales pero no globales (Figura 6). Además el problema de quedar atrapado en una zona llana es inherente al algoritmo. El algoritmo de «máxima pendiente» tiene un problema similar al no poder transitar en zonas llanas o quedar encerrado en una zona deprimida o llanas.

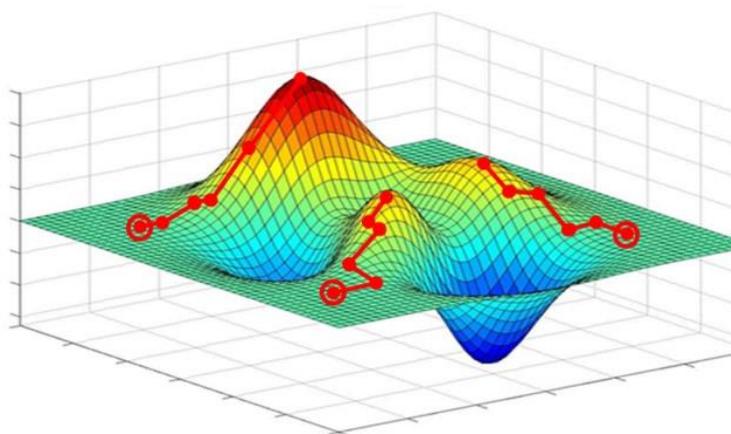


Figura 6. Ejemplos de los algoritmos de escalada.

Para solventar las deficiencias del algoritmo de máxima pendiente, se ha propuesto utilizar un algoritmo basado en la «dirección más frecuente». Este algoritmo se apoya en dos premisas:

- Un flujo de lava en su desplazamiento no cambia de dirección bruscamente sino de forma paulatina basándose en la mecánica del fluido (excepto obstáculos).
- La cantidad de movimiento de una lava permite incrementar la energía del frente de lava para ascender por zonas más elevadas no siguiendo la máxima pendiente incluso ascendiendo.

La cantidad de movimiento del sistema colada es proporcional a la masa y su velocidad:

$$P = \int \mathbf{v} \cdot \rho \cdot dV \quad [4]$$

En conjunto, la inercia del sistema colada aumenta con su longitud. Sin embargo, un cambio de dirección del frente de lava produce un cambio en la velocidad y un aumento del espesor de la lava (sobre elevación) para conservar la energía del medio continuo. Esta sobre elevación permite por ejemplo, superar obstáculos y fluir contra la pendiente natural.

Para reproducir la sobre elevación con el cambio de dirección, en cada iteración se almacena la dirección del flujo y se realiza un histograma determinando cual es la más frecuente. En caso de un cambio en la dirección del flujo, el algoritmo estará influido por la dirección más frecuente dirección, y por tanto, la lava fluirá probabilísticamente en la dirección más frecuente.

Fiabilidad de la simulación

El modelo de propagación de una célula [15] a las 8 células vecinas se puede explicar mediante la teoría de grafos. El grafo (Figura 7) se aplica sobre las células mediante la exploración de las celdas perimetrales (nodos hijo) respecto a la celda origen (nodo padre). Al tratarse de células cuadradas, los nodos a explorar son siempre 8 ramas. Si se busca el número total de posibles caminos que pueden explorarse mediante explosión combinatoria en una lava de longitud 5 kilómetros y tamaño de celda de 5 m, el factor de ramificación sería de 8^{1000} .

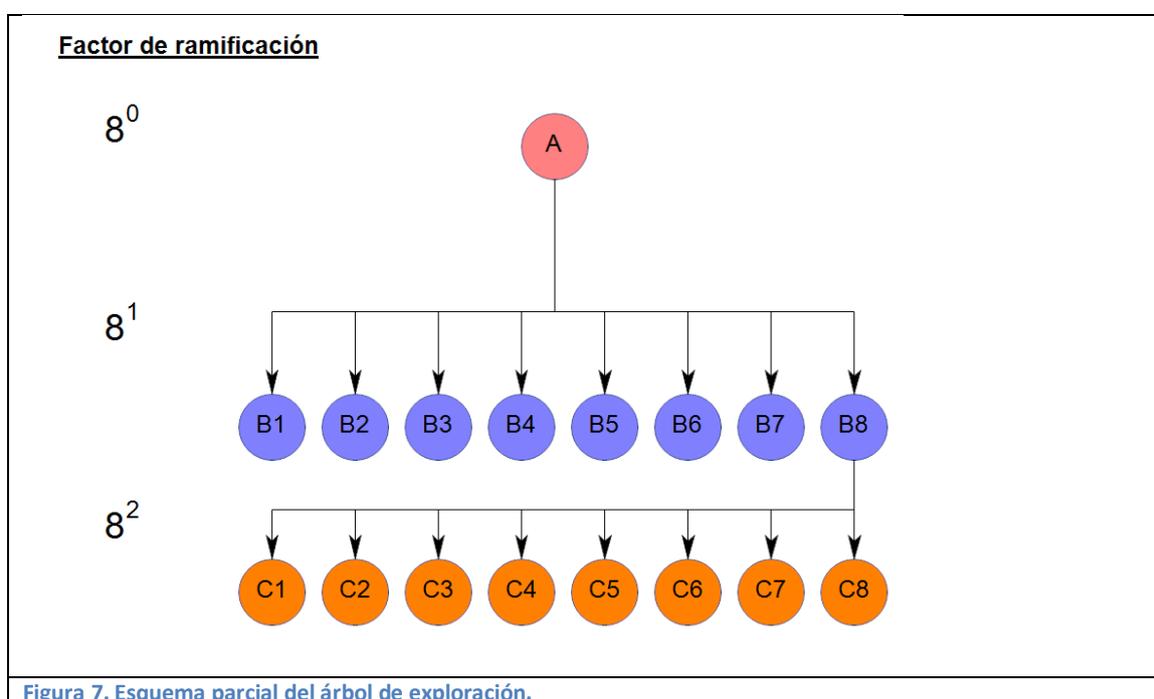


Figura 7. Esquema parcial del árbol de exploración.

Sin embargo, el «A. de máxima pendiente» sólo tiene en cuenta los nodos donde la diferencia de cota entre el nodo hijo y el padre sea negativa para que se pueda propagar el flujo. Un análisis estadístico de simulaciones de lava sobre un escenario ideal revela que el nodo padre explora en cada profundidad un número variable entre 1 y 5 ramas. Sin embargo el número de ramas más frecuente a explorar es de 3 y 4 (12% y 87% respectivamente).

Uno de los algoritmos utilizados en Inteligencia Artificial, Búsqueda por Haces [16] es un algoritmo heurístico en el que el descenso por las ramas es parcial, sólo profundizando en aquellas ramas más prometedoras. Basándonos en esta idea, se ha añadido al algoritmo un selector de número de ramas por lo que podemos acotar la simulación de la lava a las zonas con mayor probabilidad de ser invadidas y generar mapas de simulación con una fiabilidad elegida. El índice de fiabilidad de proporción lineal al número de ramas que oscila entre 0.25 a 1. El número mínimo y máximo corresponde a 2 y 8 ramas.

Distribución de volúmenes de lava.

El modelo probabilístico ELMF [12] calcula en cada celda el espesor de lava, el cual varía a partir de una función matemática preestablecida. Basando la idea en el modelo ELMF, se ha utilizado los datos de espesores de lava vs distancia de una lava cartografiada en la isla de El Hierro recogidos en campaña de campo. Los datos se han ajustado a una función polinómica de orden 4 (Figura 8).

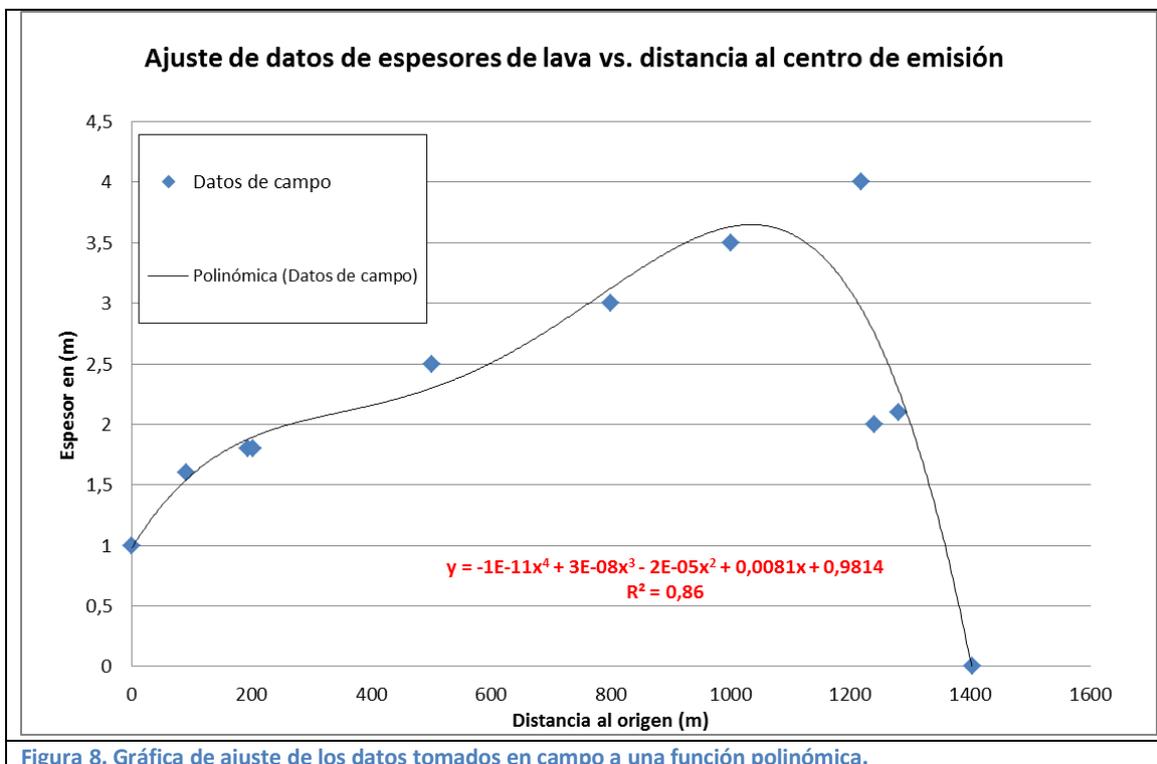


Figura 8. Gráfica de ajuste de los datos tomados en campo a una función polinómica.

Así en cada iteración, el valor del espesor de la lava en el nodo padre será calculado a partir de la distancia al origen aplicando la función polinómica. En el *input* del algoritmo se introduce el volumen de lava, y mientras se produce la simulación la matriz de espesores de lavas va incrementándose. La suma de todos los espesores de la matriz multiplicados por el área de cada celda nos dará el volumen en cada iteración. Si se supera el volumen simulado al introducido en el *input*, la simulación terminará.

Tránsito en zonas llanas

El A. de máxima pendiente no puede transitar en zonas llanas ya que es necesario que tenga zonas de desnivel. Para la resolución de esta problemática, el A. de dirección más frecuente realizará una perturbación estocástica de las alturas topográficas de las celdas hijo alrededor de la celda padre. Tras la perturbación, el A. de dirección más frecuente operará utilizando las celdas hijo que tengan una altura topográfica menor que la de la celda padre.

Relleno de las depresiones.

El algoritmo para el relleno de las depresiones se activa cuando la diferencia de cota de todos los nodos hijo al nodo padre es positiva. Para salir de la depresión, el nodo padre buscará el nodo hijo con la menor diferencia de cota. A partir de aquí, la celda padre se autorellenará hasta alcanzar al nodo hijo. Una vez allí, el flujo se propagará a ese nodo hijo.

Modelo Digital de Elevación Dinámico

La propagación del flujo de la lava a lo largo del MDE implica la acumulación del espesor de lava en su tránsito y el relleno de depresiones. Para evitar, que la lava pueda volver a pasar dos o más veces por el mismo nodo durante una iteración, se añadirá al MDE los espesores y/o rellenos de lava.

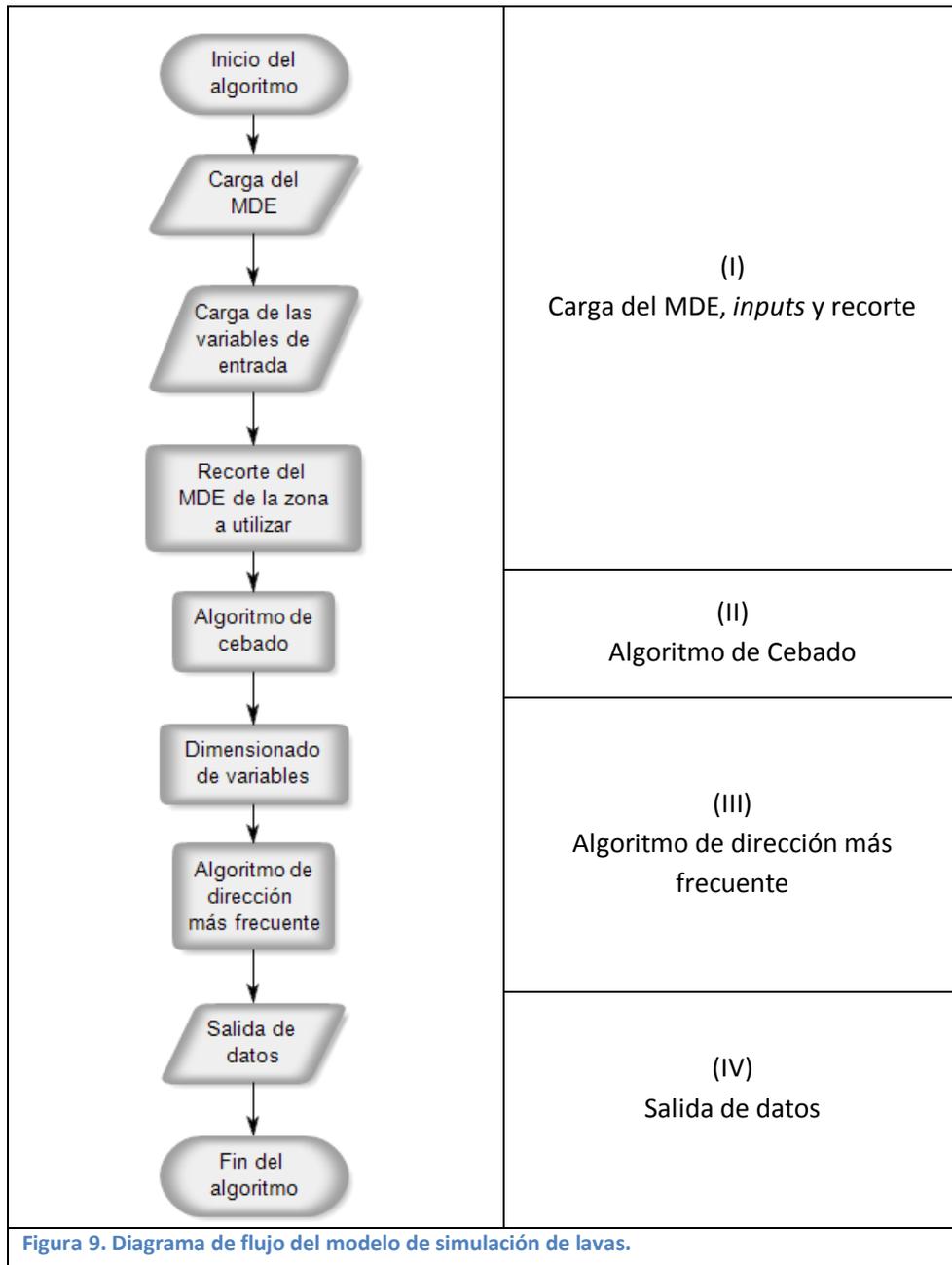
En la siguientes iteraciones, las zonas deprimidas que hayan sido rellenadas no volverán a rellenarse de esta forma se ahorra un tiempo computacional considerable.

5.1.2.- Optimización de matrices

Los modelos de simulación actuales necesitan como base para la simulación el modelo digital de elevaciones de la zona donde se va a simular. En condiciones normales, un MDE abarca grandes áreas del territorio en relación con la escasa superficie ocupada por una colada. Así, un MDE de celda de 5 m para la isla de El Hierro se convierte en una matriz de 5081 x 5681 elementos de tipo doble que generalmente es infrautilizado en la simulación de una lava. Para evitar que esto ocurra, se ha propuesto que el algoritmo realice un «recorte» del MDE sólo de la zona, que va a ser realmente utilizada por el algoritmo. Este recorte se efectúa a partir de la variable suministrada en el *input*.

5.2.- Desarrollo del algoritmo

El nuevo modelo probabilístico denominado ALAMO (EnhAnced Lava Model) integra las mejoras propuestas en el fundamento teórico. El lenguaje de programación para el desarrollo del algoritmo ha sido MATLAB® v2013a puesto que permite operar con elementos cartográficos (MDE y *shapefile*) y la optimización de matrices y vectores.



Para su diseño de ALAMO se ha dividido en cuatro bloques (Figura 9):

- I. Carga del MDE, *inputs* y recorte.
- II. Algoritmo de cebado.
- III. Algoritmo de simulación.
- IV. Salida de datos

BLOQUE I. Carga del MDE, *inputs* y recorte.

5.2.1.1.- Carga del MDE.

Los Modelos Digitales de Elevación suministrados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) están formateados en formato Arc Grid para ser importados dentro del Sistema de Información Geográfica ArcGis®. Para su importación dentro de MATLAB se utilizará la función

arcgridread. El MDE es un fichero formado por una matriz de 5081 x 5681 elementos donde se reflejan las cotas topográficas (Z). Además contiene el índice de referencia de las coordenadas X e Y. Todos los valores están en unidades de metros. Las matrices resultantes de la carga se han almacenado en las siguientes variables *MDE_X*, *MDE_Y*, *MDE_Z*.

5.2.1.2.- Inputs.

La carga de los datos de entrada (*inputs*) se obtiene de un fichero de texto. Los datos que contiene el fichero de texto (Tabla 1) proporcionan los datos para la simulación:

Descripción	Variable	Unidades
Coordenadas del punto de emisión de la lava	<i>Xvent, Yvent</i>	m
Longitud de prevista del recorte en metros	<i>Lcut</i>	m
Volumen de flujo a simular	<i>Lav_vol_in</i>	m ³

Tabla 1. Descripción de los datos presentes en el fichero *lava_data.txt*

5.2.1.3.- Recorte.

El tránsito de la lava por la superficie de un MDE ocupa una superficie menor por lo que es necesario eliminar la zona no utilizada. Para eliminar la zona no útil, se utilizará las coordenadas del punto de emisión (*Vent*) y se trazará un cuadrado de longitud $2L_{cut}$, centrado en el punto de emisión (Figura 10).

El cuadrado obtenido tiene vértices de coordenadas conocidas, con estas coordenadas proyectadas sobre el MDE permitirán obtener las coordenadas X, Y y la cota topográfica asociada a cada una de ellas. Las matrices se han denominado *Sub_Matrix.X*, *Sub_Matrix.Y*, *Sub_Matrix.Z*.

Una vez obtenida la matriz recortada el MDE es eliminado para liberar memoria.

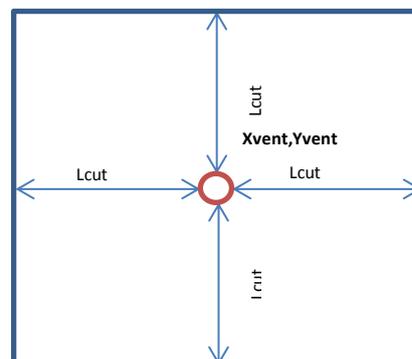


Figura 10. Área recortada alrededor del punto de emisión

BLOQUE II. Algoritmo de cebado.

El Algoritmo de Cebado es una versión simplificada del «A. de máxima pendiente» que tiene como objetivo recoger los datos de las direcciones por las que puede discurrir la lava sobre una longitud limitada del terreno.

El fin de este algoritmo es:

- Obtener un histograma de las direcciones hacia las que puede fluir la lava puesto que el «A. de dirección más frecuente» necesita datos iniciales (variable *strike*) para entrar en funcionamiento (cebado).
- Minorar la influencia de obstáculos que puedan existir en la zona de apertura del centro de emisión y que pueden producir un cambio importante en la dirección de la colada.

El Algoritmo de Cebado tras 1000 iteraciones y una longitud de la colada de 100 unidades almacena en un histograma las 7 direcciones (N,NE,E,SE,S,SW,W,NW). Aquellas tres direcciones con mayor frecuencia son almacenadas en la variable *strike*. A la dirección más frecuente se le asigna un valor de frecuencia de 2 y las otras direcciones restantes 1.

BLOQUE III. Algoritmo de dirección más frecuente.

En este bloque se desarrolla la simulación de la lava a partir de los datos de la variable *strike* y el modelo digital de elevación recortado *Sub_Matrix.X*, *Sub_Matrix.Y*, *Sub_Matrix.Z*. Una vez terminado, el bloque III entregará los resultados al bloque IV.

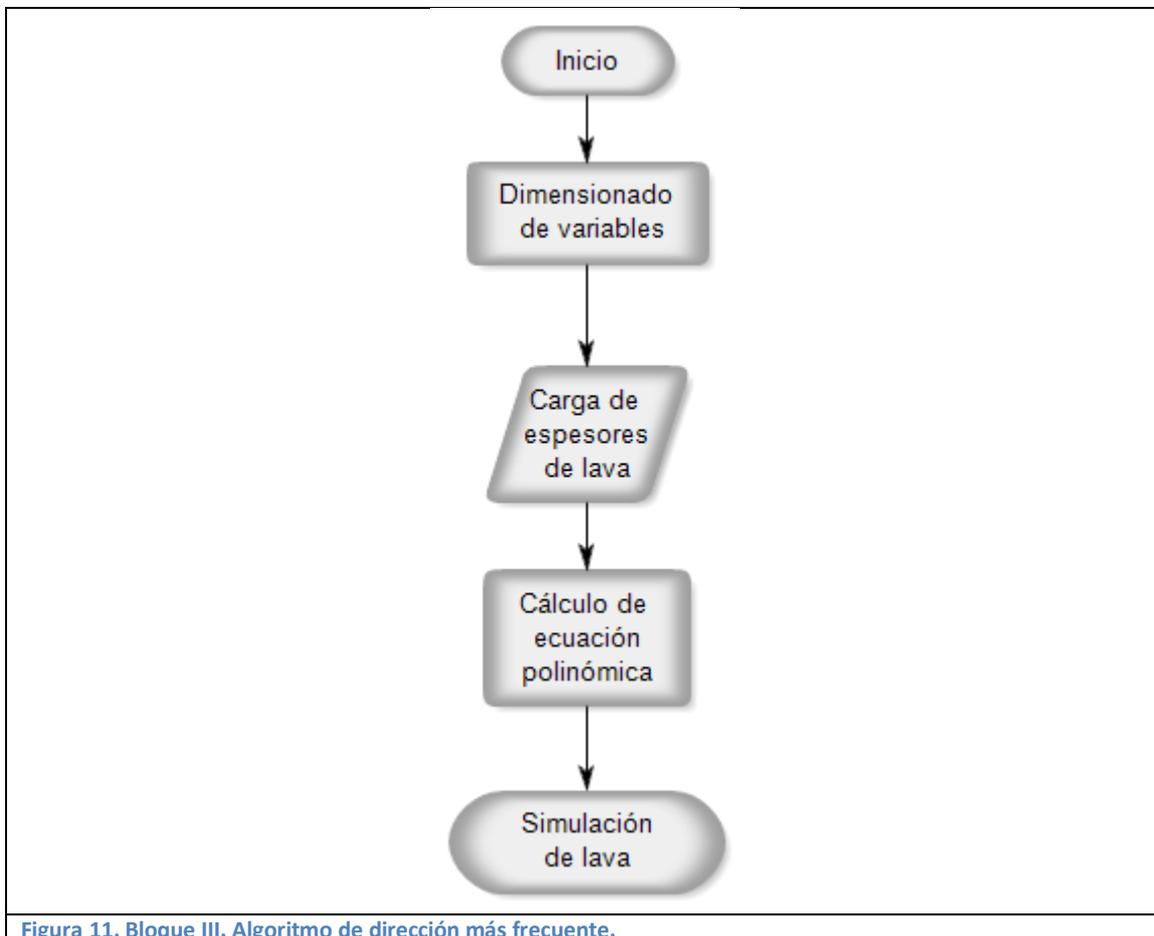


Figura 11. Bloque III. Algoritmo de dirección más frecuente.

5.2.3.1.- Dimensionado de variables

En esta parte del algoritmo, se ha realizado el dimensionamiento de las variables que se van a utilizar en la simulación (Tabla 2).

Variable	Descripción
<i>cell_num</i>	Número de celdas para iterar
<i>Lav_Path</i>	Matriz de traza de lava en bucle interno
<i>Lav_Path_all</i>	Matriz de traza de todas las lavas
<i>Lav_Fill</i>	Matriz de rellenos de lava.
<i>Lav_Tick</i>	Matriz de espesores de lava en bucle interno
<i>Lav_Tick_all</i>	Matriz de todos los espesores de la lava
<i>dataset</i>	Matriz de datos temporal en bucle interno
<i>eul_idx</i>	Índice de Euler
<i>eul_vec</i>	Vector de almacenamiento de números de Euler
<i>cell_num_inc</i>	Índice de incremento en el número de celdas a iterar

<code>reach_sea</code>	Alcance al mar
<code>lav_vol_sim_v</code>	Vector con el número de volúmenes simulados temporales
<code>thick_data</code>	Datos cargados de relación espesor /distancia
<code>p_tick</code>	Ecuación polinómica.
<code>iter</code>	Contador de número de iteraciones.

Tabla 2. Listado de variables utilizadas en el algoritmo de dirección más frecuente.

5.2.3.2.- Carga de espesores de lava y ajuste.

El cálculo de los espesores de lava que se asignarán en las iteraciones se obtiene de un fichero externo de datos reales tomados en campo sobre espesor de una colada y la distancia estimada al centro de emisión.

Una vez cargados se han ajustado mediante el método de mínimos cuadrados a una función polinómica de orden 4 cuya ecuación ha sido almacenada en `p_tick`.

5.2.3.3.- Simulación de lava.

El algoritmo para la simulación de la lava se ha construido mediante dos bucles (Figura 12). El bucle interno es el que propiamente realiza el movimiento de la lava y el externo se encarga de controlar la simulación y cuando debe pararse.

Bucle interno

El bucle interno se inicia con la comprobación que las coordenadas del frente de la lava no están fuera de la matriz de las coordenadas Z ni ha alcanzado la orilla del mar. Después se produce la obtención de las coordenadas Z, de toda la vecindad de la celda.

En la matriz *dataset* se calcula la diferencia de altura del frente de lava respecto a las celdas vecinas teniendo en cuenta el espesor de la lava. Se añaden a *dataset* las frecuencias de dirección así como datos adicionales de ocupación de celdas. La matriz *dataset* es enviada a la función *explorer* siendo esta función el «núcleo» de todo el algoritmo de simulación.

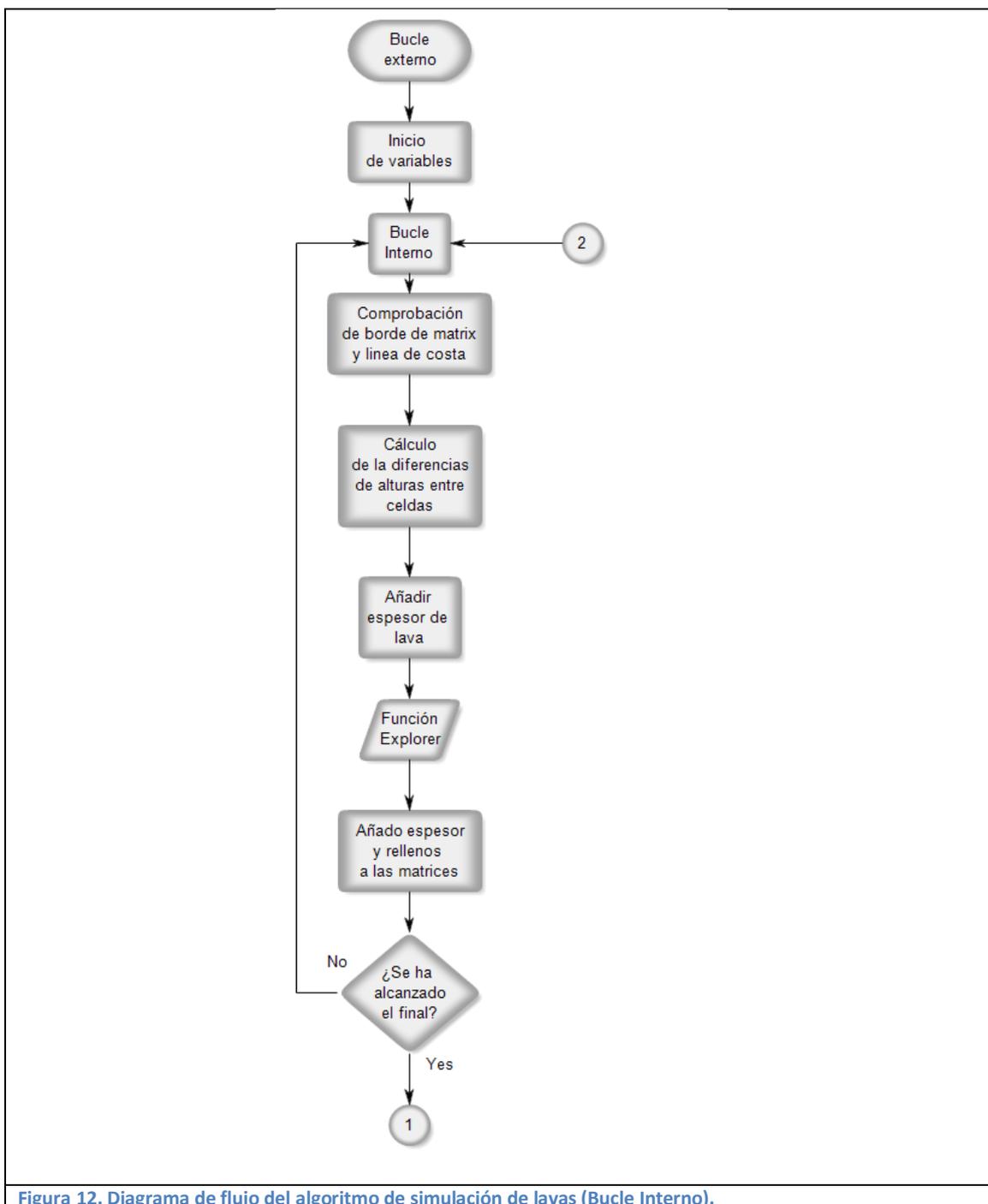


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo de simulación de lavas (Bucle Interno).

Función Explorer

El algoritmo de la función *Explorer* (Figura 13) tiene como objetivo determinar hacia que nodo se va a propagar el flujo. El algoritmo en función de la diferencia de altura topográfica entre el nodo padre hacia los nodos hijos determinará la acción a tomar:

- Si las diferencias topográficas son negativas, el algoritmo selecciona los nodos negativos y se propaga hacia una de ellos utilizando el A. de dirección más frecuente.

- Si las diferencias topográficas son positivas en casi todos los nodos, el frente de lava se mueve en los nodos de diferencia cero y se propaga al nodo hijo de menor altura.
- Si las diferencias son positivas, la lava se encuentra encerrada. En este caso, se produce el relleno y la propagación a la celda con menor altura topográfica.
- Si todas las diferencias con los nodos hijos son cero, la lava se encuentra en una zona llana. En este caso, se produce una perturbación estocástica de las celdas vecinas creando diferencias topográficas y se selecciona los nodos hijo con altura topográfica negativa. Posteriormente, utilizando el A. de dirección más frecuente, se propaga hacia el nodo hijo que presente más frecuencia.

Una vez la función *Explorer* ha terminado entrega el resultado de la celda sobre la que se propagará el flujo. Los nuevos espesores y rellenos de celda son añadidos a las matrices `Lav_Fill`, `Lav_Path` y `Lav_Tick`.

Una vez ha llegado al final el bucle interno se repetirá hasta que termine.

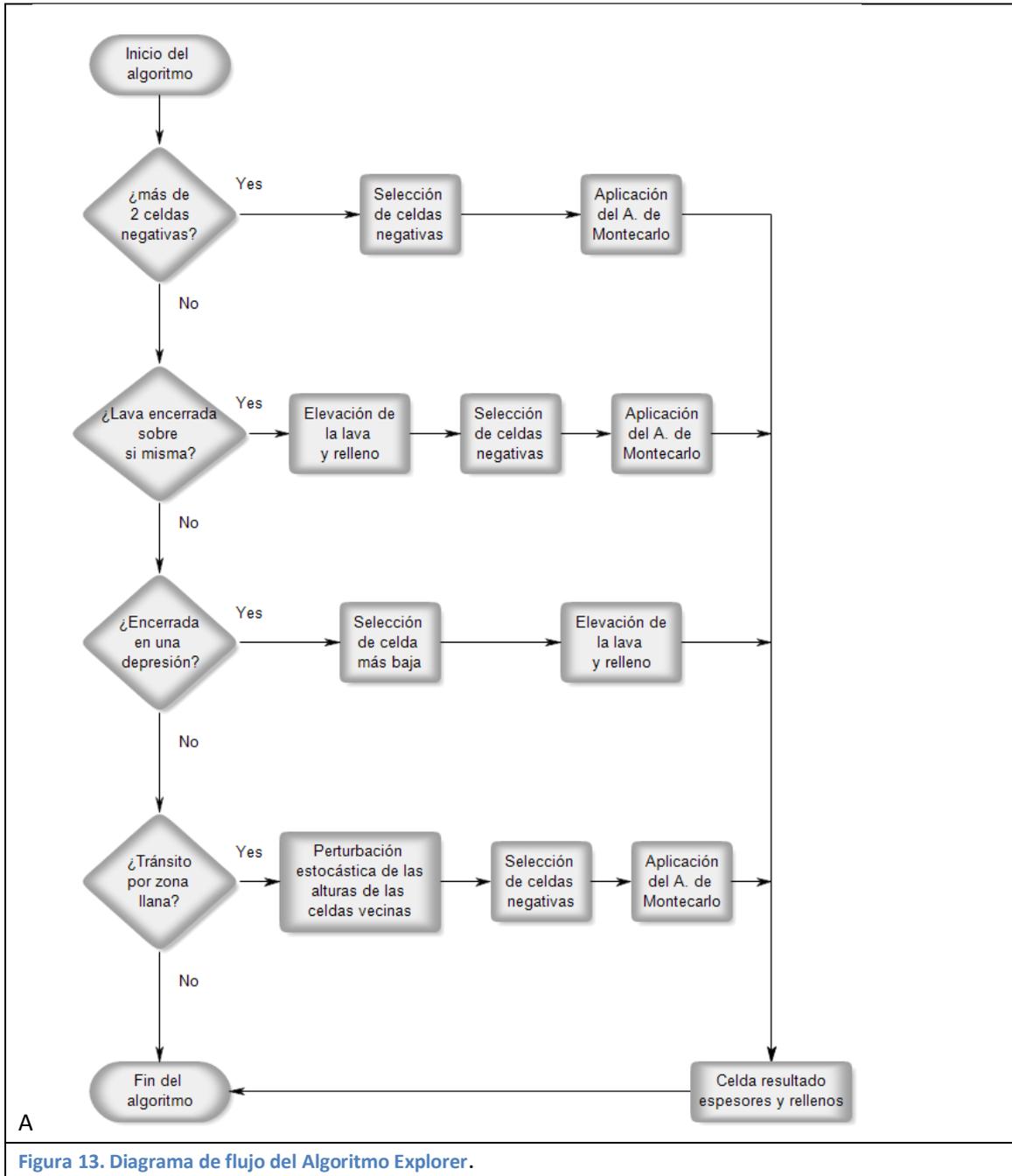
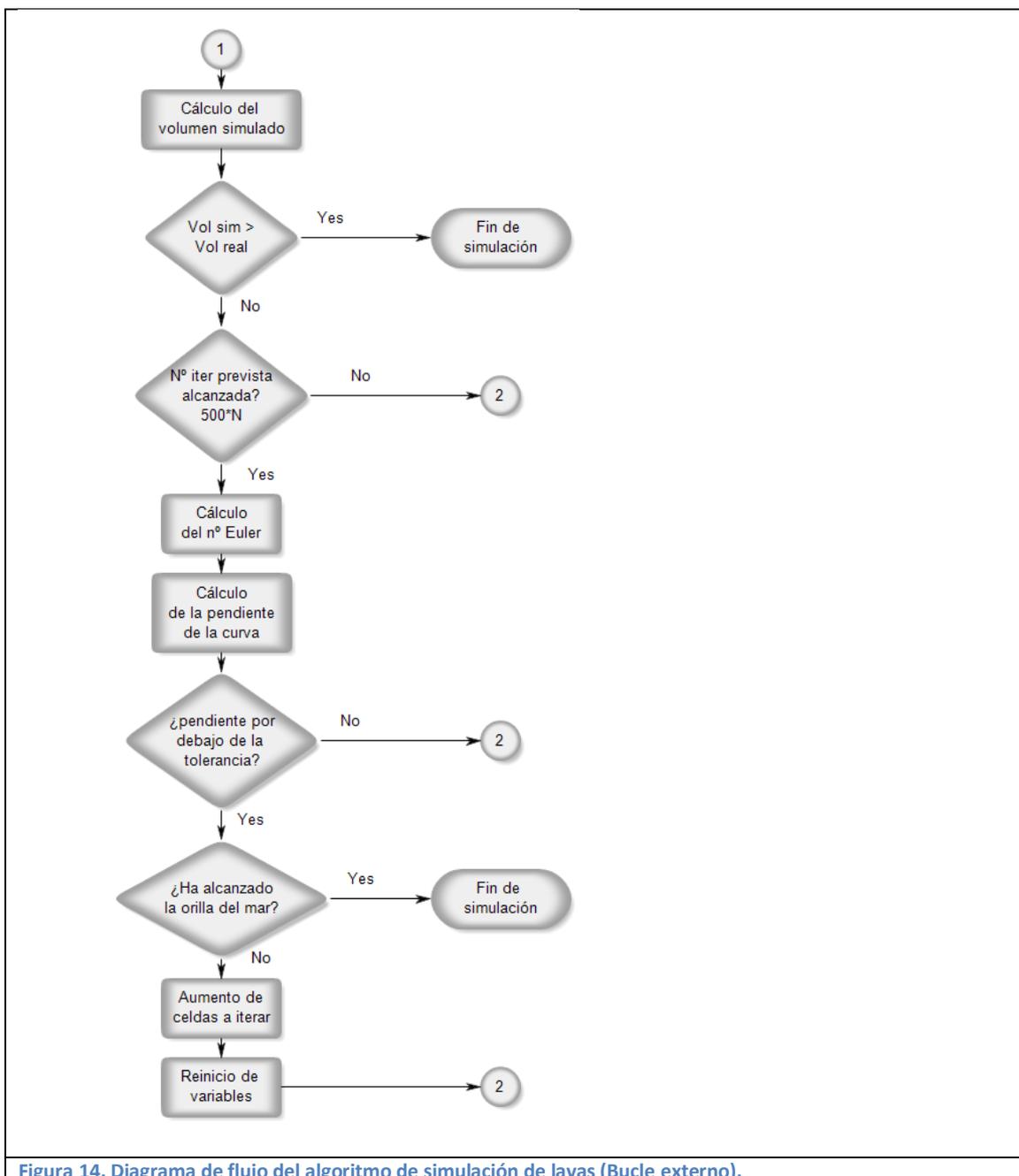


Figura 13. Diagrama de flujo del Algoritmo Explorer.

Bucle externo.

Tras ejecutarse el bucle interno, se devuelve el control al bucle externo (Figura 14) se calcula el actual volumen simulado. En caso que supere el volumen simulado al real se sale del bucle externo y termina la simulación. En caso de no superarse el volumen simulado, se calcula verifica que el número de iteraciones sea múltiplo de 500. En caso que se cumpla, se calcula el número de Euler (relación entre áreas cerradas y abiertas). Después se establece una relación entre el número de Euler y el número de iteraciones calculando la variación de pendiente entre dos iteraciones sucesivas. Si la tolerancia es inferior a 0.01 se ha estabilizado el volumen y se producirá un nuevo incremento del número de celdas a iterar (`cell_num`). De nuevo se produce un reinicio de las variables y comienza la iteración de en el bucle interno. El bucle se repetirá hasta que el volumen simulado sea igual o mayor al introducido en `Lav_vol_in`.



BLOQUE IV. Salida de datos

El Bloque IV realiza una recopilación de los datos y los almacena en tres tipos de fichero:

- Fichero de texto. Se hallan los datos como el volumen simulado, área simulada, tiempo de simulación.
- Fichero tipo ASC. En este tipo de fichero se almacenarán los datos de espesores de lava, espesores de rellenos y número de simulaciones.
- Fichero de bitmap. Imágenes de los resultados.

5.3.- Validación

La validación del algoritmo se realiza mediante dos aproximaciones:

- Escenarios simulados. Los escenarios simulados tienen como objetivo probar el algoritmo en zonas muy sencillas donde más errores se pueden producir. En estos escenarios se verifica si la distribución de espesores y de superficie es consistente con el resultado esperable de una lava. También se compara con el algoritmo probabilístico VORIS [10]
- Escenario real. El escenario se llevará a cabo en la isla de El Hierro que han sido previamente cartografiados y donde se ha podido estimar el volumen expulsado durante un episodio volcánico.

5.3.1.- Escenarios simulados.

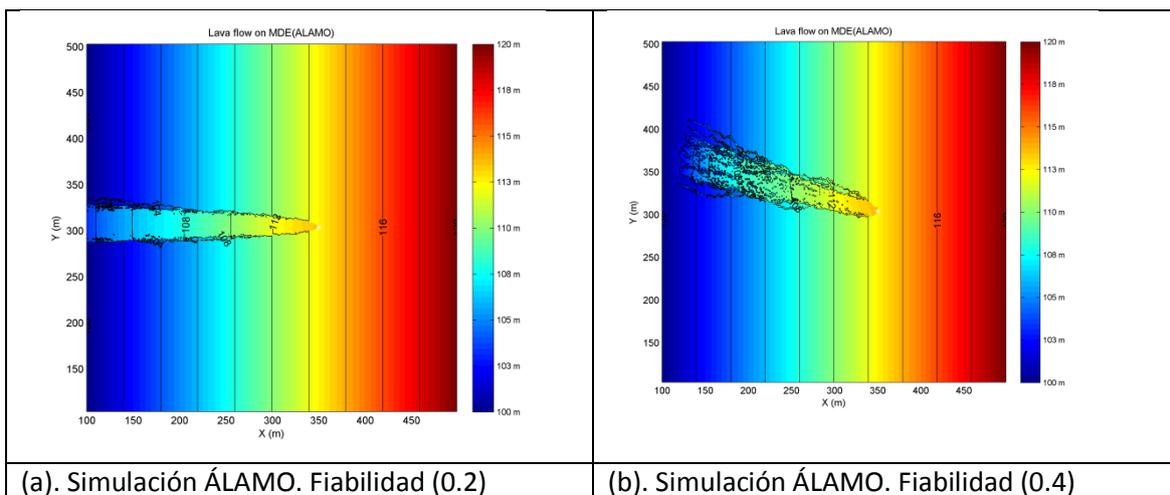
Escenario 1.

Los datos del escenario (Tabla 4) se aplicarán a ambos simuladores ÁLAMO y VORIS [10]. Debido a las características de VORIS se han añadido un espesor de lava (3 m) y un número de iteraciones de 10.000 para la simulación y una longitud de colada de 300 m.

Con estos parámetros, se han realizado 5 simulaciones en ÁLAMO pero variando el índice de fiabilidad (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0) y una simulación en VORIS (Figura 15).

Escenario 1.	
Descripción	Plano inclinado con una pendiente del 5%
Matriz	400 x 400 m
Límites de coordenadas	Xmin = 100 m Xmax = 500 m Ymin = 104 m Ymax = 503 m Zmin = 100 m Zmax = 120 m
Tamaño de celda	1 m
Coordenadas del Vent	X(350), Y(304) m
Longitud de recorte	300 m
Volumen	7.000 m ³

Tabla 3. Datos del escenario 1 así como los datos para simulación.



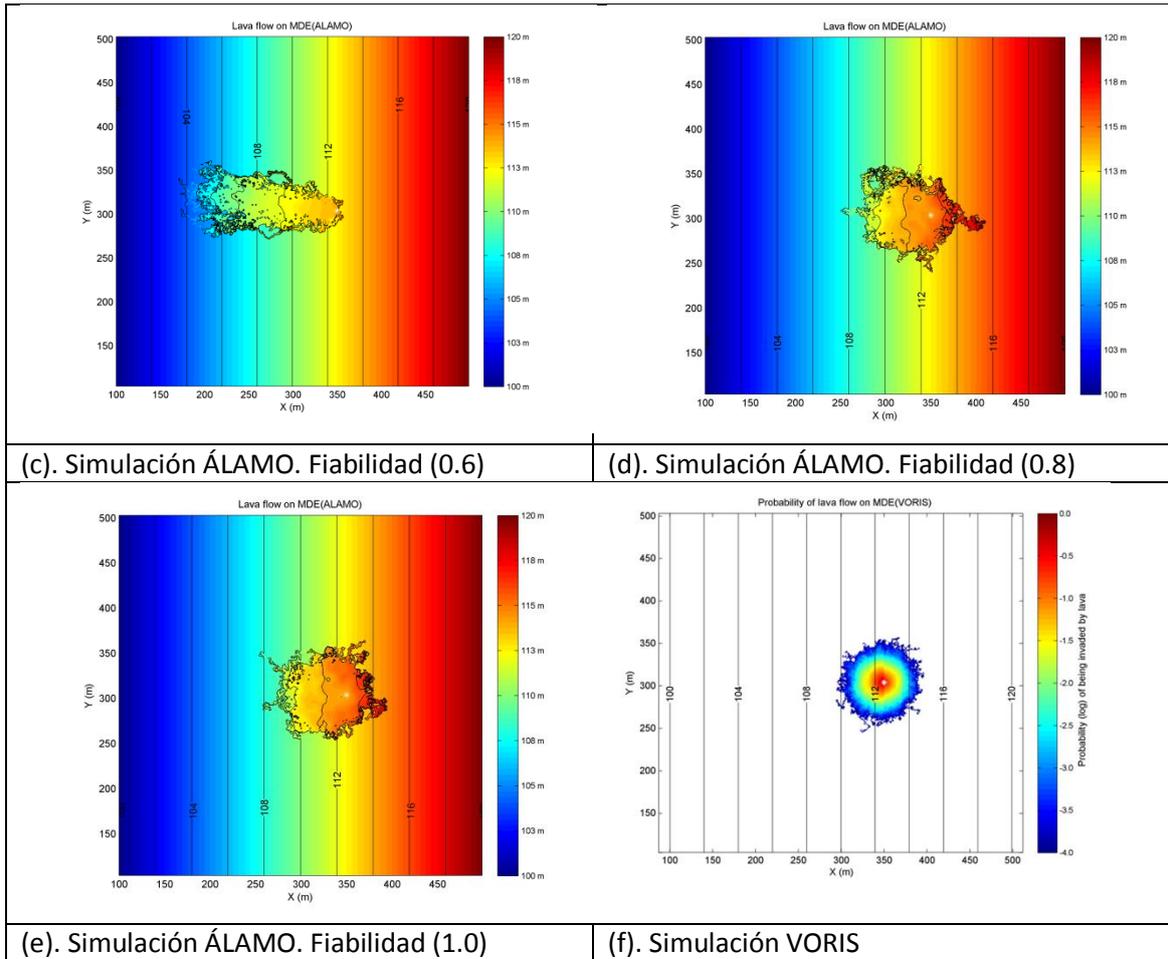


Figura 15. Simulaciones de algoritmo ÁLAMO y VORIS con diferentes grados de fiabilidad.

Los resultados en el algoritmo ÁLAMO indican que la distribución de la lava en relación con la pendiente del 5% es razonable en los índices de fiabilidad de 0.4 a 0.6 También es coherente con el valor de 0.4. Por el contrario los valores de 0.8 y 1.0 tienen una extensión menor debido a que puede expandirse lateralmente y ascender parcialmente contra la pendiente. En cambio la simulación VORIS, tiene una disposición radial respecto al centro sin asimetrías, no influyendo la pendiente en la distribución.

Las siguientes simulaciones van a utilizar una fiabilidad del 0.6 por considerarse un valor de compromiso entre fiabilidad y rapidez.

Escenario 2.

El escenario 2 se trata de un plano inclinado con una berma centra Los datos del escenario (Tabla 4) se aplicarán a ambos simuladores ÁLAMO y VORIS [10]. Debido a las características de VORIS se han añadido un espesor de lava (3 m) y un número de iteraciones de 10.000 para la simulación y una longitud de colada de 300 m.

Escenario 2.	
Descripción	Plano inclinado con una pendiente del 5% con una berma central plana en cota 110 m
Matriz	400 x 400 m
Límites de coordenadas	Xmin = 100 m Xmax = 500 m

	Ymin = 104 m Ymax = 503 m Zmin = 100 m Zmax = 120 m
Tamaño de celda	1 m
Coordenadas del Vent	X(437), Y(308) m
Longitud de recorte	400 m
Volumen	35000 m ³
Índice de fiabilidad	0.60

Tabla 4. Datos del escenario 1 así como los datos para simulación.

Los resultados de ambos algoritmos (Tabla 5) muestran un tiempo de simulación superior en A. ÁLAMO respecto a VORIS ya que también se simula la mitad de la superficie. La comparación de la extensión de ambas coladas (Figura 16) muestra una distribución muy similar a la de una colada en el caso de ÁLAMO. Sin embargo, VORIS muestra una distribución radial simétrica. La berma central (terreno llano) no impide en ÁLAMO la propagación del flujo pendiente abajo.

Podemos concluir, que la distribución espacial y espesores de lava son acordes a los de una colada real.

	VORIS	ALAMO
Superficie simulada (m²)	5280	12097
Volumen simulado (m³)	15840	3.0332e+04
Tiempo de simulación (s)	27.50	60.74
Espesor medio (m)	3	2.50

Tabla 5. Resultados del escenario 1 para ambas simulaciones.

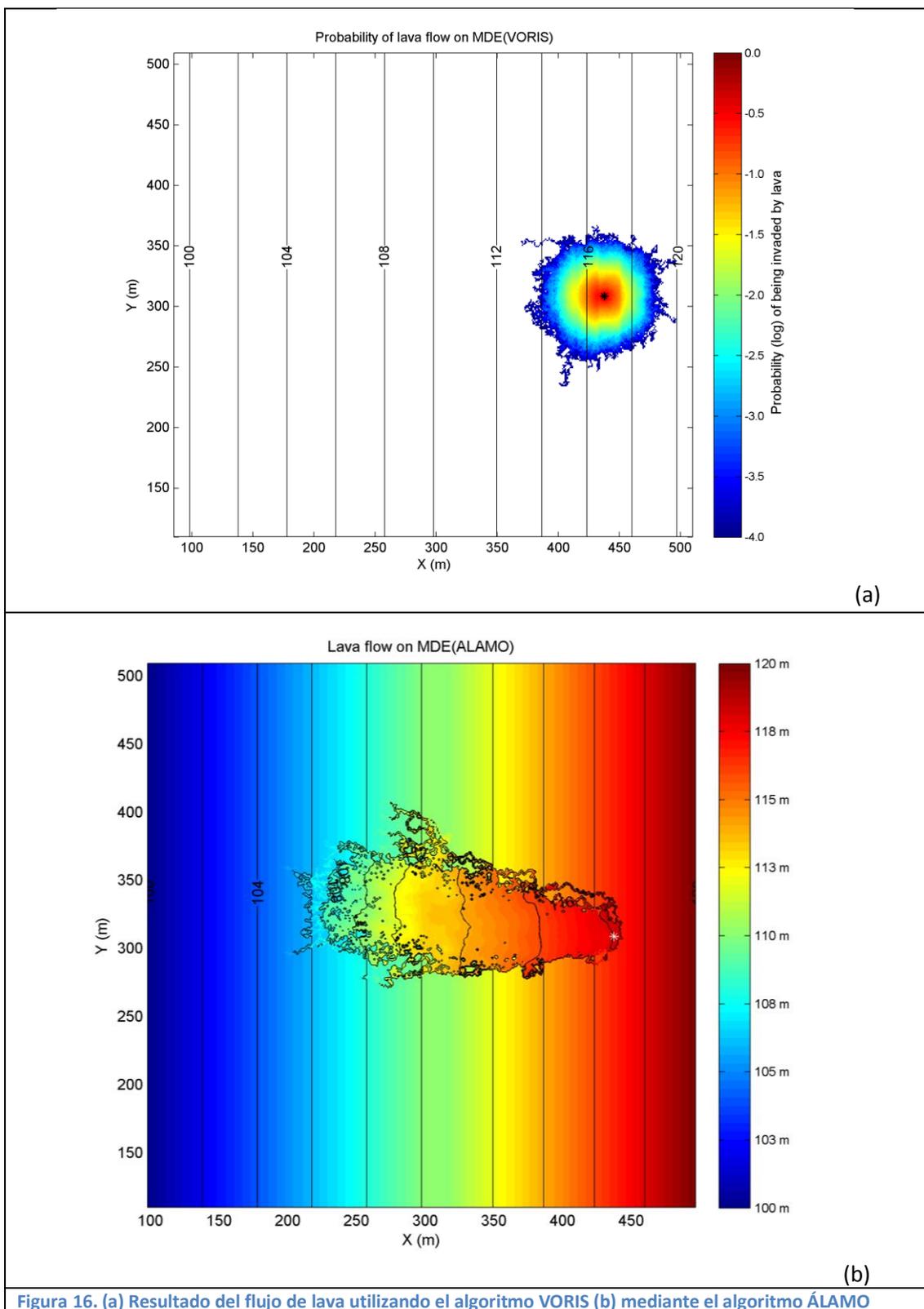


Figura 16. (a) Resultado del flujo de lava utilizando el algoritmo VORIS (b) mediante el algoritmo ÁLAMO

Escenario 3

Este escenario reproduce una zona plana con una depresión. En el centro de la depresión, se ha situado un centro de emisión que producirá un flujo de lava (Tabla 6). Para la

simulación de VORIS se han añadido un espesor de lava (3 m), un número de iteraciones de 10.000 para la simulación y una longitud de colada de 2900 m.

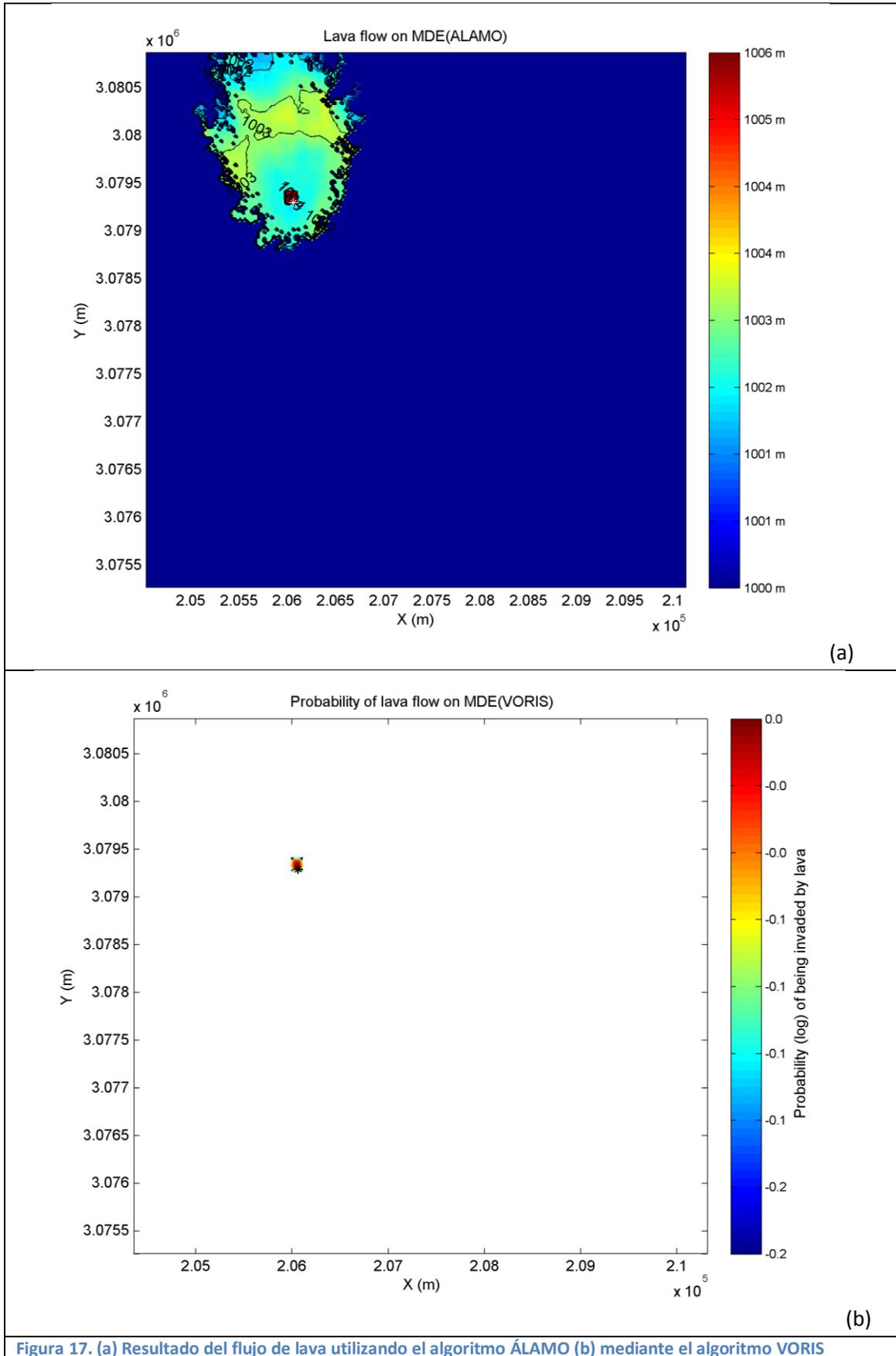
Escenario 3.	
Descripción	Zona plana con una depresión de 10 metros de profundidad.
Matriz	225 x 225 m
Límites de coordenadas	Xmin = 204537,50 m Xmax = 210137,50m Ymin = 3075262,50 m Ymax = 3080862,50m Zmin = 990 m Zmax = 1000 m
Tamaño de celda	25 m
Coordenadas del Vent	X(206062.50), Y(3079287.50) m
Longitud de recorte	2900 m
Volumen	6E6 m ³
Fiabilidad del modelo	0.60

Tabla 6. Datos del escenario 1 así como los datos para simulación

Los resultados de la simulación en ÁLAMO (Figura 17) muestran que la simulación realiza correctamente el relleno de la depresión y la lava consigue salir de la misma. El movimiento de la lava fuera de la depresión es coherente con la distribución de una colada así como la distribución de sus espesores. La simulación de VORIS no consigue salir de la depresión no siendo una distribución coherente con la realidad de una colada.

	VORIS	ALAMO
Superficie simulada (m²)	18750	2180000.00
Volumen simulado (m³)	56250	6003473.74
Tiempo de simulación (s)	9.21	25.36
Espesor medio (m)	3	2.64

Tabla 7. Datos del escenario 3 así como los datos para simulación.



5.3.2.- Escenario real

La zona piloto donde se harán las simulaciones está ubicada en la isla de El Hierro (Islas Canarias) en un conjunto de conos volcánicos denominados Montaña del Cascajo en Nisdafe (NE de la isla). Es un grupo de conos alineados de coordenadas aproximadas de (207346, 3077915) en el Huso 28R que destaca por ser un conjunto extremadamente pequeño, cuyo único depósito lávico se solidificó sin llegar a la línea de costa. Esto lo hace ideal para las simulaciones. El cono volcánico principal que expulsó la única lava basáltica tiene una longitud de 1,4 kilómetros y volumen aproximado de 400.000 m³. Los datos de geometría de la colada han sido tomados durante una campaña de campo realizada en 2011. Está estimada a través de la cartografía del IGME que tiene una edad Holocena.

Objetivos y simulaciones

Los objetivos son simular una colada con los datos geométricos (superficie y volumen) de la lava actual y ver la coincidencia entre la simulación y la colada real.

Existen limitaciones en las simulaciones están asociadas a la calidad de los datos de entrada. La principal limitación está asociada al MDE que representa la superficie de la isla del año 2008 y no la superficie previa a la colada emitida por Montaña del Cascajo. Esto conlleva errores en la simulación que deben ser tenidos en cuenta. También el MDE, incluye algunos elementos antrópicos que distorsionan el MDE previo a la erupción como son desmontes de carreteras, banales, muros,... que influyen en las decisiones del algoritmo.

Los datos de entrada (Tabla 8) para el algoritmo ALAMO van a servir para realizar un total de 7 simulaciones (una simulación por cada rama elegida). Los datos a introducir son las coordenadas del centro de emisión, el volumen y la longitud de recorte establecida en 1400 m. El MDE tiene un paso de malla de 5 metros del año 2008.

Datos de entrada para el algoritmo ALAMO	
Coordenadas del centro de emisión	207346, 3077915
Volumen (m ³)	4E5
Modelo Digital de Elevaciones	Fuente: www.ign.es Tamaño de celda: 5 m
Número de ramas/Índice de fiabilidad	2-8 (0. 25 – 1.0)
Longitud de recorte (m)	1400

Tabla 8. Datos de entrada para las simulaciones sobre la zona piloto (ALAMO)

Los datos de entrada para el simulador VORIS (Tabla 9) se han variado las alturas de colada entre 1 a 3 metros y longitud de colada entre 1.4 a 7.5 km. En todos los casos se ha utilizado un número de iteraciones de 10.000.

Datos de entrada para el algoritmo VORIS	
Coordenadas del centro de emisión	207346, 3077915
Modelo Digital de Elevaciones	Fuente: www.ign.es Tamaño de celda: 5 m
Longitud de colada (km)	1.4, 2.4, 7.5
Altura de colada (m)	1, 3
Nº iteraciones	1E4

Tabla 9. Datos de entrada para las simulaciones sobre la zona piloto (VORIS).

Resultados

Las simulaciones llevadas a cabo en ambos algoritmos muestran diferencias significativas (Tabla 10 y Tabla 11). Las simulaciones del algoritmo ALAMO (Figura 18) se solapan en relación a la lava en un 80% para los número de rama bajos (2,3,4) (Figura 18abc). Esto es un resultado esperable, ya que una lava real tiene bordes laterales que se enfrían rápidamente y limitan el movimiento lateral de la lava haciendo que la mayoría de la lava discorra por zonas de máxima pendiente. Así las simulaciones con menor número de rama, se aproximan más a la superficie cubierta por la lava real de Montaña del Cascajo.

En cambio, en las simulaciones donde se explora un mayor número de ramas, se amplía la zona de búsqueda haciendo que algoritmo tenga una mayor amplitud pero menos profundidad y por tanto menor longitud final de colada simulada.

Los resultados del algoritmo VORIS (Figura 19) tiene resultados muy desiguales. Inicialmente se realizaron dos simulaciones con espesor de colada de 3 m y longitud 1.4 y 7.5 kilómetros (Figura 19cd). La simulación de longitud 1.4 km (Figura 19c) apenas realiza solape con la lava real además que la longitud alcanzada es un tercio de la longitud prevista. En cambio, en la simulación de longitud 7.5 km (Figura 19d), hay un buen solape pero con una sobreestimación del área enorme.

De nuevo se cambian los espesores de colada (1 m) y se varían las longitudes (Figura 19ab) que varían esta vez entre 1.4 y 2.4 km. La simulación correspondiente a la longitud de 1.4 km (Figura 19a), una vez más no alcanza la longitud deseada a la par que se produce una sobreestimación del área ocupada. La simulación con longitud 2.4 km (Figura 19b), produce un buen solape con la colada real, sin embargo, hay una sobreestimación de área ocupada por la lava.

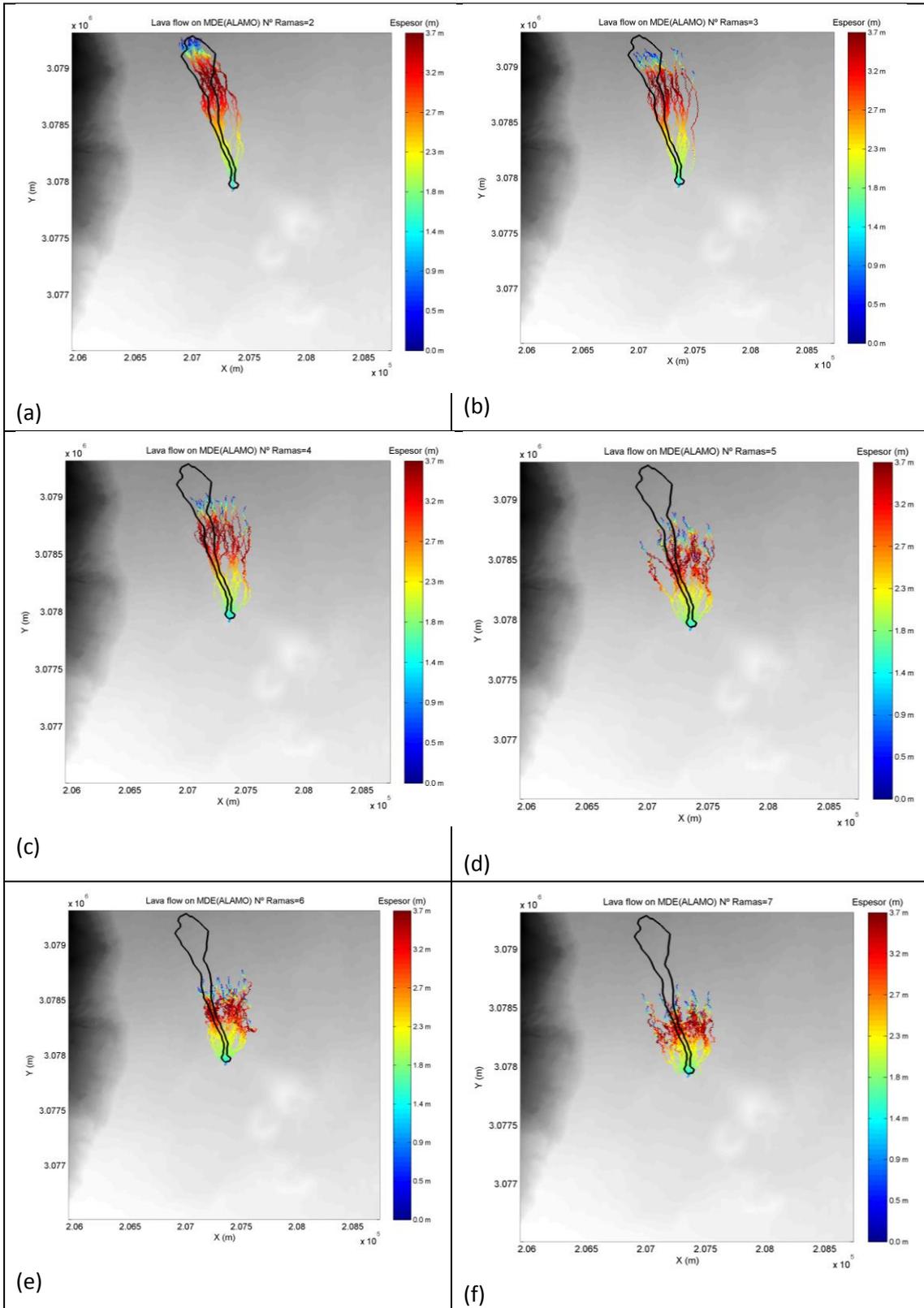
El algoritmo ALAMO podemos validarlo ya que reproduce de forma muy ajustada la colada de Montaña del Cascajo con un gran ajuste y escasa sobreestimación en el área cubierta.

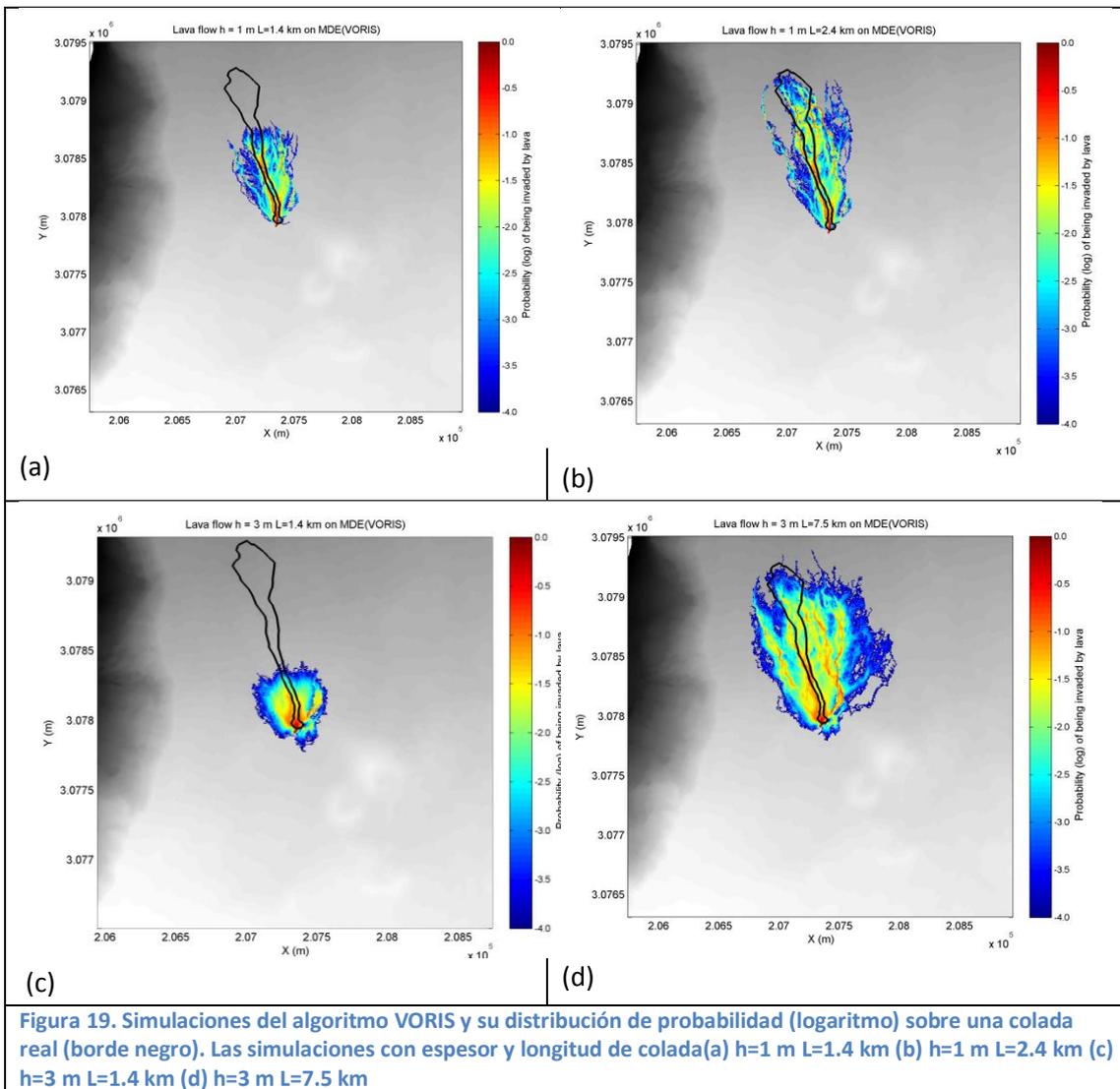
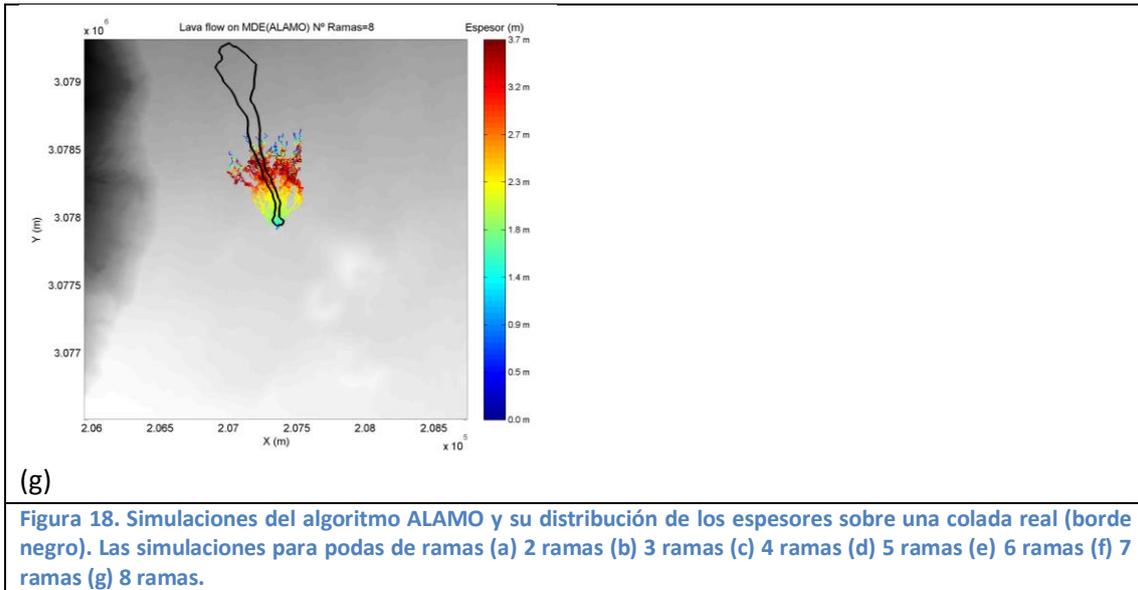
SIMULADOR ALAMO						
	Tiempo simulación (s)	Área de ocupación (m ²)	Volumen de simulación (m ³)	Espesor medio (m)	Índice de fiabilidad	Nº de ramas
Simulación 1	31.28	151850.00	401088.40	2.64	0.2	2
Simulación 2	12.08	154425.00	400283.31	2.59	0.3	3
Simulación 3	8.72	154900.00	402632.86	2.60	0.4	4
Simulación 4	7.72	160775.00	402973.69	2.50	0.6	5
Simulación 5	10.29	158150.00	402824.70	2.55	0.7	6
Simulación 6	10.34	157600.00	401133.56	2.54	0.8	7
Simulación 7	6.59	155175.00	401202.57	2.58	0.9	8

Tabla 10. Datos obtenidos de las simulaciones para el simulador ALAMO.

SIMULADOR VORIS					
	Altura corrección (m)	Longitud (m)	Tiempo de simulación (s)	Área de ocupación (m ²)	Volumen de simulación (m ³)
Simulación 1	1	1400	45.45	284025	463525
Simulación 2	1	2400	44.75	463525	463525
Simulación 3	3	1400	45.35	205425	616275
Simulación 4	3	7500	44.03	1034375	3103125

Tabla 11. Datos obtenidos de las simulaciones para el simulador VORIS.





6.- Conclusiones y líneas futuras de mejora

El algoritmo ALAMO proporciona una mejora sustancial en los algoritmos probabilísticos de predicción de la traza de un flujo lávico. Se han añadido nuevos parámetros de entrada en la simulación como el volumen de lava, así como un nuevo algoritmo de dirección más frecuente que sustituye al algoritmo de máxima pendiente que se ha mostrado con mayor eficiencia y eficacia en los resultados. Se ha resuelto las limitaciones de entrada en las depresiones que los modelos tradicionales no podían resolver y el tránsito por zonas llanas que permite que la lava fluya sin pendiente alguna. La incorporación del volumen en la simulación permite modificar la topografía del MDE lo que permite simular sucesivas lavas desde un mismo punto de emisión y ver su interferencia

Los resultados han mostrado que la simulación en un escenario real es más ajustada para índices de fiabilidad bajos (baja fiabilidad del modelo) debido al enfriamiento diferencial de las coladas en sus bordes que impiden que el fluido pueda desplazarse lateralmente. Esto explica como los modelos probabilísticos tradicionales que no tienen limitación en cuanto al número de ramas a explorar, tienen una gran expansión lateral permitiendo una sobreestimación de las áreas previsible a inundar.

Las líneas futuras de mejora están basadas en resolver uno de los grandes problemas en la carga en memoria del MDE, cuyo tamaño en el futuro será muy elevado e impedirá manejar estos ficheros con soltura. Además, si el tránsito de la lava se produce por varios MDE será necesario que se desarrolle un algoritmo que vaya seleccionando el MDE necesario en cada parte de la simulación.

Otra mejora, es la combinación entre modelos probabilísticos y determinísticos que permite obtener la rapidez de los modelos probabilísticos y la fiabilidad de los determinísticos para determinar la ruta a seguir por una lava. La simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para reducir el coste computacional y el acople de éstas con la naturaleza de un modelo probabilístico no es tarea sencilla y no está actualmente resuelta.

En conclusión, se hace necesario investigar en el desarrollo de modelos probabilísticos que permitan una mejor simulación de la realidad de los flujos lávicos a la par que puedan acoplarse cada vez mejor a modelos determinísticos.

7. - Bibliografía

- [1] A. Costa y G. Macedonio, «Computational modeling of lava flows: A review,» *Geological Society of America Special Papers*, vol. 396, pp. 209-218, 2005.
- [2] P. Young y G. Wadge, «FLOWFRONT: Simulation of a lava flow,» *Computers & Geosciences*, vol. 16, nº 8, pp. 1171-1191, 1990.
- [3] D. Barca, G. Crisci, S. D. Gregorio and F. Nicoletta, "Lava flow simulation by cellular automata: Pantelleria's examples," 1987.
- [4] D. Barca, G. Crisci, S. D. Gregorio, S. Marabini and N. F., "Nuovo modello cellulare per flussi lavici: Colate di Pantelleria," *Bollettino del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia.*, pp. 41-45, 1998.
- [5] M. Hidaka, A. Goto, S. Umino y E. Fujita, «VTFS project: Development of the lava flow simulation code LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading, and solidification,» *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol. 6, nº 7, pp. Q07008--, 2005.
- [6] A. Vicari, H. Alexis, C. D. Negro, M. Coltelli, M. Marsella y C. Proietti, «Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a Cellular Automata approach,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, nº 10, pp. 1465-1471, 2007.
- [7] H. Miyamoto y S. Sasaki, «Simulating lava flows by an improved cellular automata method,» *Computers & Geosciences*, vol. 23, nº 3, pp. 283-292, 1997.
- [8] A. J. L. y S. K. Rowland, «FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel,» *Bull Volcanol*, vol. 63, nº 1, pp. 20-44, 2001.
- [9] G. Macedonio, M. Pareschi y R. Santacroce, «A simple model for lava hazard assessment: Mount Etna,» 1990.
- [10] A. Felpeto, J. Marti y R. Ortiz, «Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment,» *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 166, nº 2, pp. 106-116, 2007.
- [11] M. Favalli, M. T. Parechi, A. Neri y I. Isola, «Forecasting lava flow paths by a stochastic approach,» *Geophysical Research Letters*, vol. 32, 2005.
- [12] M. L. Damiani, G. Groppelli, G. Norini, E. Bertino, A. Gigliuto y A. Nucita, «A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy),» *Computers & Geosciences*, nº 32, pp. 512-526, 2006.
- [13] L. Connor, C. Connor, M. Khachatur y I. Savov, «Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia,» *Journal of Applied Volcanology*, vol. 1, nº 1, p. 3, 2012.

- [14] A. Felpeto, «Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica. Tesis Doctoral (Inédita).», Universidad Complutense de Madrid, 2002.
- [15] M. Gardner, "MATHEMATICAL GAMES. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life", " *Scientific American* , no. 223, pp. 120-123, 1970.
- [16] S. J. Russell y P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2 ed., Pearson Education, 2003.
- [17] L. Quental, A. Soares y J. Gaspar, «A lava flow simulation model using a GIS as a contribution for hazard assesement as Fogo Island, Cabo Verde,» *Vulcânica*, vol. I, pp. 149-154, 2003.
- [18] A. Felpeto, R. Ortiz, M. Astiz y A. Garcia, «Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands).», *Natural Hazards*, vol. 23, nº 23, p. 247–257, 2001.