



INTEGRANDO LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE TERREMOTOS Y EL ANÁLISIS DE MODELADO 3D UTILIZANDO “VOLGIS” (UN SIG ESPECÍFICO PARA VOLCANES) PARA UNA NUEVA PERSPECTIVA DE VISUALIZACIÓN PRELIMINAR VOLCÁNICAS: EL CASO DE ESTUDIO DE MT. ETNA

Roberto GUARDO¹, Ariel UZAL², Andrés COLUBRI³, Carola DREIDEMIE²

¹Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (CONICET - UNRN).

Avenida J.A. Roca 1242, General Roca 8332, Río Negro, Argentina. Email: rguardo@unrn.edu.ar

²Laboratorio de ID+i en Visualización, Computación Gráfica y Código Creativo,
UNRN Universidad Nacional de Río Negro, Argentina.

³Department of Organismic and Evolutionary Biology, Faculty of Arts and Sciences,
Harvard University; Broad Institute of Harvard and MIT, Cambridge, USA

RESUMEN

El estudio del interior de los volcanes es necesario para la comprensión de las dinámicas del mismo, y fundamental para poder construir un modelo de predicción de las erupciones. En este trabajo evidenciamos el área de ascenso de magma del volcán Etna utilizando la técnica de modelado visual 3D llamada “Marching Cubes” (MC), usualmente aplicada a la visualización médica, combinada con la distribución espacial de 30 años de terremotos utilizando la herramienta “VolGIS” que desarrollamos para este fin.

Este innovativo sistema de información geográfica (SIG) desarrollado específicamente para el estudio de los volcanes nos permite el análisis, modelado y visualización de dato geofísico y vulcanológico en un entorno interactivo 3D y 4D, representando la ubicación geográfica exacta, aumentando así la capacidad interpretativa y que nos permite arribar a resultados unívocos. Nuestros resultados muestran estructuras tridimensionales en alta resolución que describen la forma y el tamaño del sistema de alimentación. Estos resultados (1) aumentan el detalle de las previas tomografías sísmicas profundas, en un intervalo entre el nivel del mar y 8 km debajo de este y (2) confirman los resultados de los análisis hechos por teledetección.

Creemos que “VolGIS” es una herramienta innovadora porque ofrece la posibilidad de generar nuevas hipótesis a través de la visualización interactiva de datos geofísicos y geológicos, y así arribar a resultados de relevancia dentro de la geofísica y la vulcanología.

Palabras clave: Volcano Imaging, GIS, Sistema de alimentación, Marching Cubes, Terremotos. .

ABSTRACT

Integrating spatial earthquake distribution and 3D modelling analysis using “VolGIS” (a specific GIS for the volcanoes) for a new perspective in volcano preliminary imaging: the case study of Mt. Etna. Modelling and visual imaging of the interior of a volcano is a crucial step to the comprehension of its dynamics and to the development of an efficient eruption forecasting system; among these models, high-resolution seismic image modelling yields important data to locate possible lava ascending paths, eruptive centers and forecast flank collapses. Here, we modelled the lava ascending path and feeding system of Mt. Etna (Sicily, Italy) using the Marching Cubes algorithm (MC) method, usually applied to medical visualization and 3D modelling, combining 30-years spatial earthquakes distribution data within a new customizable Geographic Information System. The development of this new volcano oriented-GIS, offers the possibility to analyze, model and visualize geological and geophysical data in an interactive 3D and 4D environment, representing their exact spatial position, and incrementing considerably the possibilities of multiple new interpretations.

The results show 3D high-resolution structures that describe the shape and location of the feeding system. Those results (1) increase the detail of the previous deeper seismic tomography imaging in a span between sea level and 8 km beneath it and (2) confirm the results of recent remote sensing imaging. This multidisciplinary approach represents an important new resource to preliminary imaging of volcanoes analysis. We believe that this tool can show

new outcomes related to the study of the volcanoes and, due to its clear visual representation, could strongly increase the ability to communicate and understand volcanological phenomena.

Keywords: Volcano Imaging, GIS-based system, Feeding System, Marching Cubes, Earthquakes. .

INTRODUCCIÓN

Los análisis de los datos geofísicos para el estudio de los volcanes han sido generalmente de incumbencia de las áreas de la física y/o de la matemática. Con el desarrollo de las tecnologías de teledetección, en combinación con la tecnología SIG, las posibilidades de generar mapas con información geográfica exacta, creció muchísimo, especialmente en relación a las necesidades de localizar elementos en un lugar geográfico exacto y para realizar “*queries*” o búsquedas, medir cantidades exactas como volumen, tamaño o la extensión de los elementos previos encontrados (Barreca et al., 2013); y para tener la posibilidad de superponer precisamente cualquier tipo de capa (mapas geológicos, mapas geotérmicos, mapas tectónicos, etc.) que permita luego vincular la interpretación de los resultados geofísicos obtenidos (De Siena et al., 2016).

No obstante, todavía no existe hoy en día, un sistema de análisis, gestión y visualización de datos exclusivo para sistemas volcánicos. El sistema que estamos desarrollando no es solo un sistema de análisis de datos sino que también es un sistema de gestión de datos y de visualización, en 2, 3 y 4 dimensiones.

La descripción del interior de un volcán es necesaria para la comprensión de sus dinámicas y es un paso fundamental para el desarrollo de un sistema eficiente de predicción de las erupciones (Del Negro et al., 2013). Los objetivos de este trabajo son (1) describir la geometría y exacta ubicación del conducto magmático del volcán Etna y (2) evidenciar la potencialidad de un sistema de este tipo, que ofrecerá a cualquier investigador la posibilidad de añadir datos y luego poder hacer distintos análisis generando resultados visualmente claros e interactivos.

MARCO GEOLÓGICO

El volcán Etna es uno de los volcanes más activos del mundo y uno de los más jóvenes. De hecho, comenzó su formación cerca de 500 mil años atrás, en el Cuaternario. La forma actual del volcán es el resultado del último sistema (“Il Piano”) (De Beni et al. 2011) y tiene una extensión de 1200 km², específicamente, 47 km de Norte a Sur y 38 km de Oeste a Este con una altura de 3350 m s.n.m.

Geológicamente, de Oeste a Norte del volcán está el arco Calabro-Peloritano, al sur el antepaís Ibleo y al Este, en el Mar Ionio, la “Malta-Hyblean escarpment” que es considerada además como la mayor discontinuidad entre la placa Africana y la microplaca Iónica al sur, como la “ventana astenosférica” que contribuye a la ali-

mentación del volcán (Branca et al, 2004; Gvirtzman et al 1999; Lanzafame et al 1997; Gillot et al, 1994; Lentini et al, 1982).

METODOLOGÍAS

Actualmente el campo de la visualización de datos está impulsado por la necesidad de analizar y comprender inmensas cantidades de información y está sostenido por las nuevas tecnologías de cómputo y programación, capacidad de procesamiento y por los avances en las tarjetas gráficas y en hardware que permiten la generación de visuales digitales y mapeos en distintos niveles, en dos, tres y cuatro dimensiones, incluso con interactividad y, si se quiere, hasta en tiempo real.

Mediante la visualización de datos procesados se hace posible detectar patrones, generar estimaciones, comprender cambios y comportamientos complejos en el tiempo y en el espacio. La visualización habilita vías alternativas e innovadoras de observación, manipulación y representación dinámica de la información y facilita su comunicación en diferentes ámbitos. En las palabras del estadístico John Tukey (1915-2000) acreditado como el pionero en el campo moderno de la visualización de datos, -“El mayor valor de una visualización es cuando nos obliga a ver lo que no esperábamos ver.”

Se establecen diferencias entre lo que se llama “visualización de información” (análisis de datos confirmativo) en donde se mapea o gráfica información ya conocida, -por lo menos conocida por los expertos- y la “visualización de datos” (análisis de datos exploratorio) en donde el mapeo gráfico digital nos ofrece una lectura o conocimiento nuevo y a lo mejor inesperado que contribuye a ampliar el conocimiento o a descubrir algo completamente no pensado previamente.

Nosotros nos estamos apoyando sobre esta metodología. La de armar un espacio visual en donde todos los datos sean incluidos, -la mayor cantidad de información posible-, para luego observar el resultado y provocar preguntas y generar conclusiones.

El sistema que estamos desarrollando se basa en Processing Development Environment. Processing es un lenguaje de programación diseñado específicamente para generar y alterar imágenes. Está basado en el lenguaje java. Fue creado por dos estudiantes de posgrado del MIT, Casey Reas y Ben Fry en el 2001 y desarrollado dentro de una amplia comunidad abierta de programadores y artistas visuales desde ese entonces hasta ahora. Actualmente existen y continuamente se agregan librerías que extienden ilimitadamente sus aplicaciones. Nuevas herramientas como esta están haciendo posible la integración de conocimientos de disciplinas diversas con las artes visuales. Artistas están ahora capacitados desde

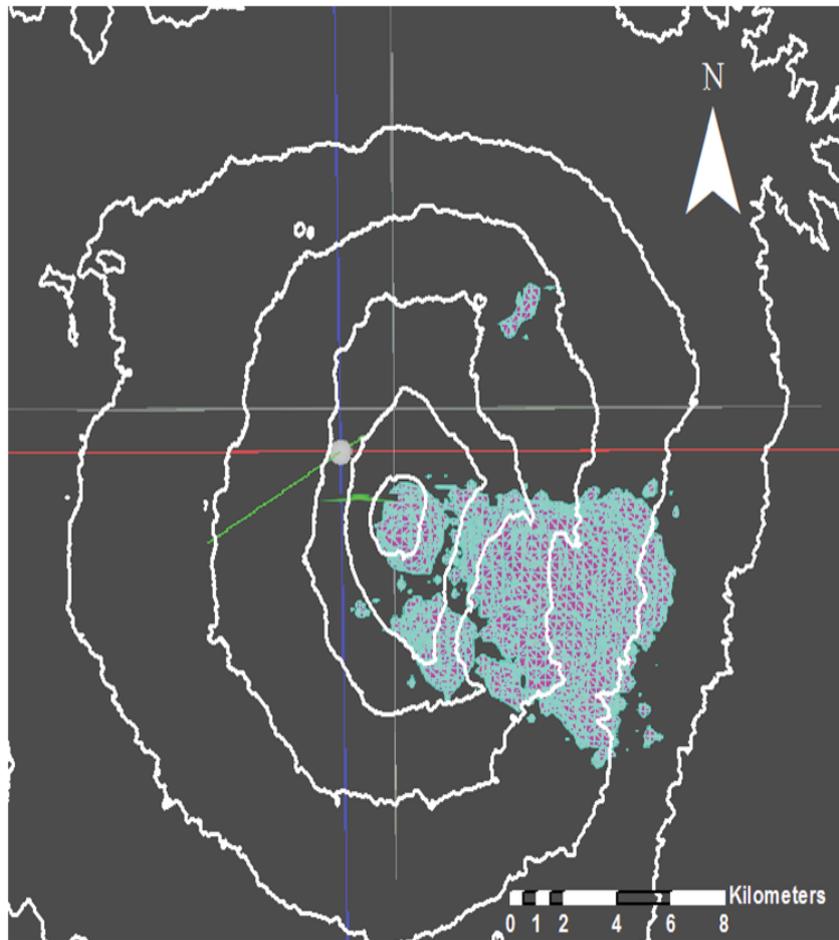


Figura 12 Las curvas de nivel indican el relieve del volcán; en azul y violeta la isosuperficie obtenida con el algoritmo Marching Cubes.

la programación para construir visuales digitales que pueden ser generadas y afectadas desde datos obtenidos por sensores o medidores usados en otras áreas de investigación - en este caso, el área de geología. Esto habilita un trabajo altamente interdisciplinario y hasta ahora innovador, abriendo campos no explorados hasta el momento.

Gracias al uso del lenguaje de programación Processing fue posible crear un sistema de información geográfica, en inglés Geographic Information System, GIS) cuya definición es: “un sistema de hardware y software que captura, almacena, edita, altera, ordena, analiza, comparte y muestra datos georreferenciados” [Fu and Sun, 2010], específicamente dedicado a los volcanes. El uso del sistemas GIS es indispensable para una análisis de este tipo por su capacidad de colocar cualquier tipo de elemento (ej. mapas geológicos, mapas geotérmicos, mapas tectónicos, etc.) en su lugar geográfico exacto, permitiendo así comparar la interpretación de los resultados obtenidos (De Siena et al., 2016, Guardo and De Siena, 2017). Entre las características básicas de un GIS, se encuentra la posibilidad de realizar “queries” o bús-

quedas, medir cantidades exactas como un volumen, tamaño o la extensión de los elementos previos encontrados (Barreca et al., 2013). En *VolGIS* además, está ya implementada la posibilidad de hacer análisis de densidad usando el algoritmo “Marching Cubes”.

El “Marching Cubes” (MC) es un algoritmo de reconstrucción de una superficie y/o de generación de un contorno 3D de un volumen en un espacio (Lorenson et al., 1987), también conocido con el nombre de “3D Contouring” o “Surface Reconstruction”. El algoritmo MC se usa más comúnmente en imágenes médicas para reconstrucción de superficies de distintos órganos a partir de datos de tomografía por resonancia magnética, y también se aplica para generar gráficos computacionales y modelados 3D, muy fundamental y fuertemente desarrollado desde la industria de la comunicación visual para animación 3D y diseño de videojuegos. Se ha usado en la visualización de datos para simular dinámica de fluidos en ingenierías. El MC opera sobre un campo escalar definido en un volumen dado, y genera una aproximación a la isosuperficie o superficie de valores constantes en el campo escalar. En nuestro caso generamos la isosu-

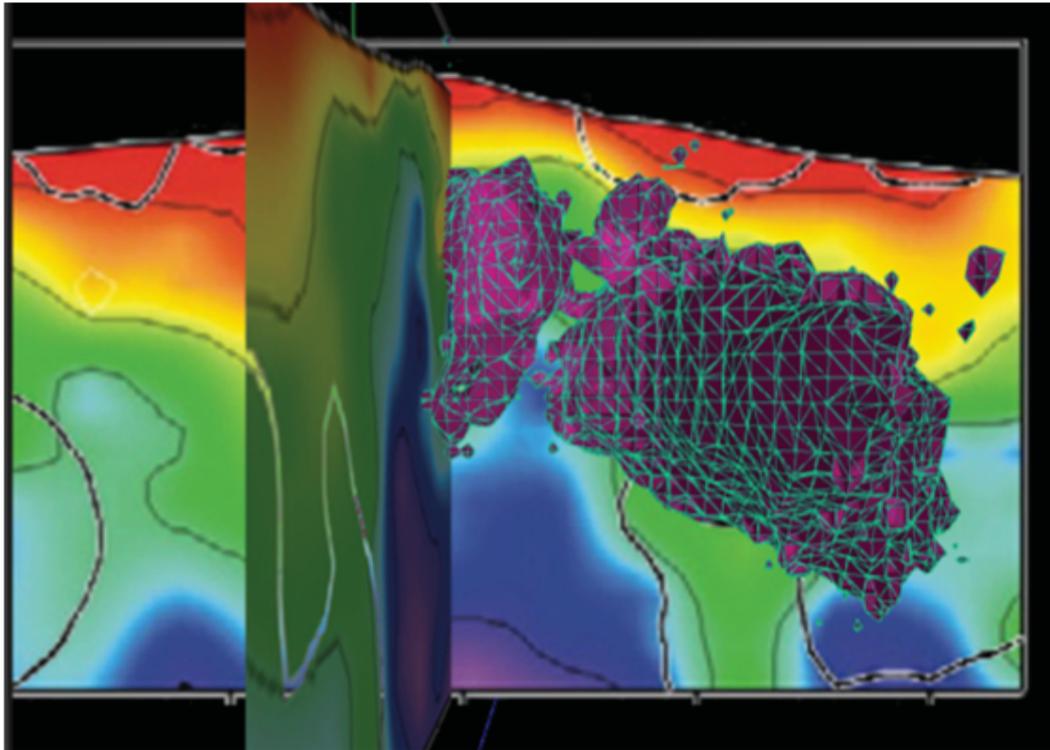


Figura . . Visualización tridimensional de la isosuperficie obtenida con el algoritmo Marching Cubes.

perficie para el valor constante cero, que de esta manera representa la superficie que envuelve el volumen donde el campo escalar no es nulo. En este momento hay un gran interés en esta técnica, con numerosos avances recientes (Masala et al., 2012; Jun et al., 2012) y aplicaciones en disciplinas tan variadas como farmacología, química, geofísica y meteorología (Newman & Yi, 2006).

RESULTADOS

La aplicación de *VolGIS* con datos del Etna revela estructuras tridimensionales en alta resolución, que describen visualmente y espacialmente el área de ascenso de magma. Esto aporta un aumento del detalle conocido desde las tomografías sísmicas previas. Las tres estructuras evidenciadas desde la isosuperficie, confirman la existencia de un volumen caracterizado por una alta densidad sísmica que rodea otro de baja densidad sísmica. Este volumen de baja o casi nula densidad sísmica es evidencia de que el interior del volcán presenta una transición desde un régimen frágil, de las capas más superficiales, a un régimen dúctil, a causa de un aumento de la temperatura, que podemos interpretar entonces como el área o espacio de ascensión del magma.

Las isosuperficies obtenidas tienen una extensión de 11 km de oeste a este, 8 km de norte a sur y, en profundidad, 5 km en la parte oeste y 8 km en la parte oeste (Fig. 1). Estas estructuras además de que describir la forma y ubicación del sistema de alimentación del volcán, au-

mentan el detalle del análisis de las previas tomografías sísmicas y confirman los resultados de los estudios recientes en el campo del imagen por sensores remotos (“remote sensing imaging”) (Fig. 2).

CONCLUSIONES

Gracias a este trabajo consideramos que la multidisciplinariedad entre la geofísica/geología y la visualización gráfica, combinada con los sistemas de información geográfica y las técnicas de teledetección representan un importante recurso para hacer análisis preliminares en los modelos volcánicos, disminuyendo costos y riesgo de pérdida de equipos y vidas en las salidas de campo. Esta es una herramienta innovadora que ofrece la posibilidad de abrir nuevas hipótesis y mostrar nuevos resultados dentro de la geofísica y la vulcanología, posibilitando también, una comunicación más comprensible del fenómeno volcánico frente a las sociedades.

AGRADECIMIENTOS

LVCC, Laboratorio de ID+i en Visualización, Computación Gráfica y Código Creativo,

UNRN Universidad Nacional de Río Negro - Sede Andina - Argentina

Desarrollado dentro del proyecto PI UNRN 40-B-372 Creación de Visualizaciones de Datos desde y para diversas áreas de conocimiento.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Barreca, G., Bonforte, A., & Neri, M. (2013). A pilot GIS database of active faults of Mt. Etna (Sicily): A tool for integrated hazard evaluation. *Journal of volcanology and geothermal research*, 251, 170-186.
- Branca, S., Coltelli, M., & Groppelli, G. (2004). Geological evolution of Etna volcano. *Mt. Etna: volcano laboratory*, 49-63.
- De Beni, E., Branca, S., Coltelli, M., Groppelli, G., & Wijbrans, J. R. (2011). ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic dating of Etna volcanic succession. *Italian Journal of Geosciences*, 130(3), 292-305.
- De Siena, L., Calvet, M., Watson, K. J., Jonkers, A. R. T., & Thomas, C. (2016). Seismic scattering and absorption mapping of debris flows, feeding paths, and tectonic units at Mount St. Helens volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, 442, 21-31.
- Del Negro, C., Cappello, A., Neri, M., Bilotta, G., Hérault, A., & Ganci, G. (2013). Lava flow hazards at Mount Etna: constraints imposed by eruptive history and numerical simulations. *Scientific reports*, 3, 3493.
- Fry, Ben 2007: Visualizing Data Exploring and Explaining Data with the Processing Environment. O'Reilly Media Final Release.
- Fu, P., & Sun, J. (2010). Web GIS: principles and applications.
- G.L. Masala, B. Golosio, P. Oliva, An improved Marching Cube algorithm for 3D data segmentation, *Computer Physics Communications*, Volume 184, Issue 3, March 2013, Pages 777-782, ISSN 0010-4655, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2012.09.030>.
- Gillot, P. Y., Kieffer, G., & Romano, R. (1994). The evolution of Mount Etna in the light of potassium-argon dating. *Acta Vulcanol*, 5, 81-87.
- Guardo, R., & De Siena, L. (2017, April). Integrating passive seismicity with Web-Based GIS for a new perspective on volcano imaging and monitoring: the case study of Mt. Etna. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 19, p. 249).
- Gvirtzman, Z., & Nur, A. (1999). The formation of Mount Etna as the consequence of slab rollback. *Nature*, 401(6755), 782-785.
- Lanzafame, G., & Bousquet, J. C. (1997). The Maltese escarpment and its extension from Mt. Etna to Aeolian Islands (Sicily): importance and evolution of a lithosphere discontinuity. *Acta Vulcanologica*, 9, 113-120.
- Lentini, F. (1982). The geology of the Mt. Etna basement. *Mem. Soc. Geol. It*, 23, 7-25.
- Lorensen, W. E.; Cline, Harvey E. (1987). "Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm". *ACM Computer Graphics*. 21 (4): 163-169. doi:10.1145/37402.37422
- Newman, Timothy S.; Yi, Hong (2006). "A survey of the marching cubes algorithm". *Computers and Graphics*. 30 (5): 854-879. doi:10.1016/j.cag.2006.07.021
- T. Jun, L. Xu, W. Yongming and C. Jianjie, "Self-adaptive marching cubes 3D surface reconstruction method for 3D-GIS spatial raster volume data," 2012 International Conference on Image Analysis and Signal Processing, Hangzhou, 2012, pp. 1-4. doi: 10.1109/IASP.2012.6425062
- Tufte, Edward R. 1990: *Envisioning Information*. Graphics Pr.
- Tufte, Edward R. 1997: *Visual Explanations: Images and Quantities, Evidence and Narrative*. Graphics Press.
- Tufte, Edward R. 2001: *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Pr, Ed. 2.
- Tufte, Edward R. 2006: *Beautiful Evidence*. Graphics.