



Delimitación de susceptibilidad ante peligro volcánico mediante teledetección: Caso de la Isla Fogo utilizando primeros resultados de la misión Sentinel 1A.

Delimitation of susceptibility to volcanic hazard by remote sensing: Case Fogo Island using first results of the Sentinel 1A mission.

Daniela Ledezma¹, Vania Aguilera², Margot Quiriban², Ivo Fustos²

¹ Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Católica de Temuco, Chile.

² Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.
dledezma2013@alu.uct.cl, Teléfono: +56-9-46426207.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
04-11-2016
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Isla Fogo
Interferometría
Sentinel 1A
Riesgo Volcánico

Article history:

Received
04-11-2016
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Fogo Island
Interferometry
Sentinel 1A
Volcanic risk

Resumen

La isla Fogo, ubicada en el archipiélago de Cabo Verde (14°55'3" N, 23°30'32"W), posee un estratovolcán activo asociado a un volcanismo intraplaca. Con base en imágenes satelitales microondas y posterior análisis interferométrico, se observaron deformaciones provocadas por el último evento eruptivo y con el fin de poder integrar esta técnica con antecedentes recopilados del área de estudio, se delimitaron zonas de riesgos permitiendo generar un mapa exploratorio preliminar. Resultados iniciales muestran que los patrones de deformación observados son consistentes a procesos de falla producto de la tectónica local (patrón de "mariposa"). Además, permitieron establecer una relación entre peligrosidad, riesgo y vulnerabilidad de una erupción para la zona de estudio, donde se muestra finalmente una delimitación de los riesgos. Cabe destacar que se necesita de mayor información del lugar para poder hacer una delimitación de riesgos de forma óptima, eficiente y concluyente, producto de algunos errores que se puedan observar en el mapa exploratorio. Esto podría ser subsanado a través de un análisis satelital más robusto y nuevos datos in situ detallados del lugar. A partir de los interferogramas, se pudo definir el control estructural permitiendo delimitar la susceptibilidad que presenta esta isla ante los riesgos que puede producir este volcán. Finalmente, este caso de estudio permite mostrar que el conocimiento generado a partir de técnicas remotas puede ser transferido a análisis de casos de estudio en territorio nacional, lo cual permitirá mitigar riesgos y desarrollar planes de emergencia en base a los patrones históricos de conducta del volcán, observados a través de satélite.

Abstract

Fogo Island, located in the archipelago of Cape Verde (14 ° 55'3 "N, 23 ° 30'32" W), possesses an active stratovolcano associated with an intraplate volcanism. Based on satellite images microwave and subsequent interferometric analysis, deformations caused by the last eruptive event were observed, and in order to integrate this technique with background data collected from the study area, risk areas were delimited allowing the generation of a preliminary exploratory map. Initial results show that the observed deformation patterns are consistent with faulting processes produced by local tectonics ("butterfly" pattern). In addition, they allowed to establish a relation between hazard, risk and vulnerability of a volcanic eruption for the study area, where a risk definition is finally shown. It is necessary to obtain more information of the place to delimit the risks in an optimal,



efficient and conclusive level, product of some errors that can be observed in the exploratory map. This could be remedied through more robust satellite analysis, and new in-situ detailed data. From the interferograms, it was possible to define the structural control allowing to delimit the susceptibility that presents this island before the risks that can produce this volcano. Finally, this case study shows that the knowledge generated from remote techniques can be transferred to case studies analysis in the national territory, which will mitigate risks and develop emergency plans based on the historical patterns of behavior of the volcano, observed through satellite.

1. Introducción.

El daño material que pueden generar los productos de una erupción volcánica muchas veces no es conocido debido a la falta de evidencia histórica del lugar. Ejemplos de lo anterior han sido reportados en la zona sur de Sudamérica tales como el Volcán Chaitén [15]; Nevado de Longaví [23]. Normalmente en países en vías de desarrollo, la vigilancia volcánica queda limitada por recursos económicos o capital humano capacitado [12]. En dicho contexto, el uso de sensores remotos en los últimos años ha posibilitado comprender de mejor manera la geodinámica de los procesos eruptivos. Casos destacables pueden ser zonas con presencia de volcanismo intraplaca, en la cual existe un ascenso de material magmático procedente del manto, el cual termina formando hot-spots [5].

Normalmente, los hot-spots son capaces de generar islas asociadas a actividad volcánica intraplaca, dentro de la que destaca la Isla Fogo ubicada en el Atlántico frente a las costas de África (**Figura 1**). La mayoría de las islas volcánicas generan inconvenientes en la seguridad de la población adyacente (ejemplos de casos lo menciona Carracedo et. al., en la Isla Tenerife) [4]. Islas ubicadas en países en vías de desarrollo no poseen mapas que permitan evaluar el riesgo que corre la población producto de la actividad volcánica de la isla. De esta manera, es de vital importancia comenzar a generar estrategias de zona de riesgo, recopilando información que evidencie el peligro que puede provocar la actividad efusiva de un volcán. En condiciones de actividad volcánica de intraplaca, utilizar sensores remotos permite monitorear procesos eruptivos permitiendo cubrir espacio-temporalmente la zona sin la necesidad de incurrir en gastos logísticos elevados ni comprometer vidas humanas. En ese sentido se propone utilizar como caso de estudio el proceso eruptivo del volcán Pico do Fogo para generar un mapa de riesgo que permita entregar mejores herramientas de planificación territorial.

En el presente trabajo se estudia el proceso eruptivo de la Isla Fogo, ubicada en la República de Cabo Verde. Esta isla es la más característica de esta república, ya que presenta un estratovolcán

activo denominado Pico do Fogo que registra actividad desde el siglo XV y, que hasta entonces, no ha cesado. Por lo cual mediante imágenes satelitales microondas y análisis interferométricos, se observará la deformación provocada por el último periodo eruptivo registrado el 23 de noviembre del 2014 hasta el 8 de febrero del 2015. Para esto, se realizarán técnicas de interferometría con radar de apertura sintética (InSAR), con el fin de poder integrar esta técnica con antecedentes recopilados del área de estudio, delimitar zonas de riesgo y poder generar un mapa exploratorio de riesgo. Esta técnica consiste en utilizar dos imágenes obtenidas por un radar de apertura sintética (SAR) adquiridas de la misma región en dos posiciones temporalmente diferentes, lo que permite detectar diferencias en la elevación topográfica y/o deformaciones que hayan ocurrido en el lugar [3]. Estudios como el de Gonzales et. al. [11], donde se propone esta misma técnica para su estudio de evaluación de deformaciones en esta misma zona, serán utilizados como referencia para el desarrollo de este estudio.

2. Zona de estudio.

Fogo es una de las islas ubicadas en el Archipiélago de Cabo Verde en el Océano Atlántico, al noroeste de África (14°55'0" N, 24°25'0" W, **Figura 1**). El sistema corresponde a un estratovolcán con una caldera de 9 km de ancho, con volcanismo explosivo y magmas de tipo basáltico. Esta isla presenta cuatro estructuras geológicas bien definidas: 1) El antiguo estratovolcán Monte Amarelo que condiciona la actual morfología de la isla, 2) La posterior caldera de deslizamiento de su flanco E que deja un anfiteatro de unos 20 km de perímetro y paredes subverticales de hasta 1.000 m de desnivel (denominado como Bordeira), 3) El citado estratovolcán de Pico do Fogo anidado en el interior de esta caldera y una meseta casi plana entre ambas estructuras llamada Chã das Caldeiras formada por el relleno de materiales volcánicos proveniente de Pico do Fogo, y, 4) Conos satélites que chocan y se acumulan contra Bordeira. La evolución geológica de Pico do Fogo sigue las secuencias típicas de volcanismo intraplaca con un crecimiento muy rápido [19].



Figura 1. Mapa de la zona de estudio creado para este estudio.

La zona posee tres sistemas de fallas principales con direcciones tectónicas NW-SE, NE-SW y N-S (Figura 2). También se puede encontrar un patrón de fractura radial, relacionado con el estratovolcán central. El sistema de falla N-S está bien expresado por una alineación clara de los conos a lo largo de la Zona de Falla Sambango-Monte Vermelho, la cual puede haber controlado el colapso de los flancos de Fogo. En Chã das Caldeiras se identificaron varias fallas, algunas de ellas relacionadas con la erupción de 1995. Una de las más espectaculares es la falla Boca Fonte del NW-SE que se puede observar en el escarpe de falla de Bordeira. Esta falla presenta una rotura superficial corta (en uno de los centros eruptivos iniciales) y está alineado con el escarpe sur de falla S. Jorge. La falla de Monte Beco, también involucrado en el evento de 1995, representa el sistema de tendencias NE-SW [2].

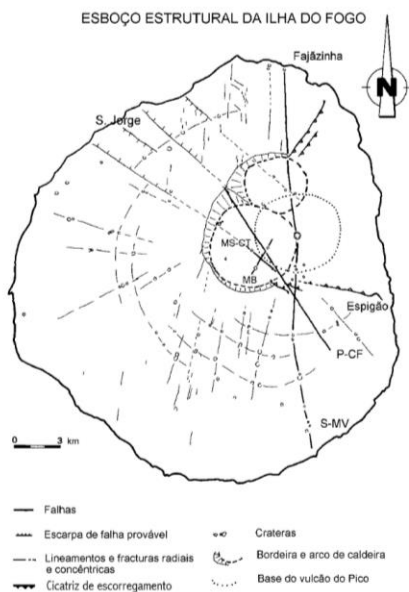


Figura 2. Estructura de la Isla Fogo. Fuente: Brum da Silveira et al., 1997.

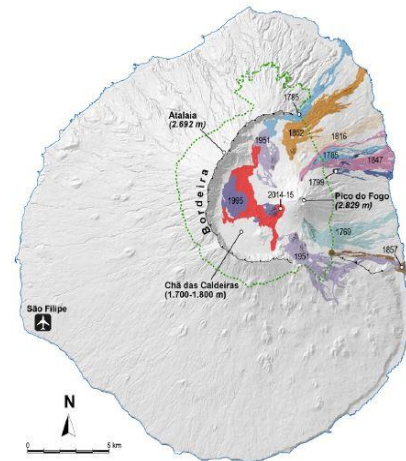


Figura 3. Mapa de la zona donde se registran las erupciones históricas y sus estructuras geológicas más relevantes. Fuente: Perez-Torrado et al., 2015.

3. Metodología.

Con el objetivo de delimitar las zonas y generar un mapa de riesgo, se integrará evidencia de datos de sensores remotos con antecedentes in situ de la zona de estudio. Dentro de los datos de sensores remotos, se desea observar la morfología de la zona y deformaciones que pueda presentar este volcán. Para los antecedentes in situ se analizarán los registros históricos que presenta la isla, como coladas de lavas históricas, además de relieve y pendiente. A partir de lo anterior, se recopilaron imágenes satelitales SAR del satélite Sentinel 1A, con datos de longitud de onda de 5.2 cm, en la fase previa a la erupción (3 de noviembre del 2014) y en la fase de término de ésta (2 de enero del 2015), con el fin de analizar y observar las deformaciones ocurridas durante la erupción para así integrar esta evidencia con erupciones pasadas y realizar un mapa de riesgo.

Las imágenes SAR obtenidas deben pasar por diferentes procesos para poder crear interferogramas. Este procesamiento se realiza por medio del software SNAP (Sentinel Application Platform), con el fin de precisar con mayor detalle los elementos de deformación



presentes en la isla. La configuración interferométrica InSAR explota la diferencia de fase entre dos observaciones de radar SAR complejas tomadas de posiciones ligeramente diferentes del sensor, extrayendo la información acerca de la superficie de la tierra. Esta información se recoge desde satélites en órbita. Para este caso se utiliza el satélite Sentinel 1A que posee un sensor SAR en banda C que ofrece imágenes de media y alta resolución en todas las condiciones climáticas; esta se encuentra en una órbita polar, sincrónica al sol, lo cual le permite adquirir datos tanto en nodos ascendentes (de sur a norte) como descendentes (de norte a sur). Este tiene como por objetivo principal el monitoreo terrestre y de los océanos [9].

La realización del interferograma en el programa SNAP está formulado por la multiplicación cruzada de una imagen seleccionada como maestra con el resto de imágenes denominadas esclavas, esto debido a las imágenes obtenidas de las órbitas ascendentes y descendentes (**Tabla 1**). Luego se procede a la corrección de la imagen, donde se asegura que cada objetivo terrestre contribuye a la misma, ya sea el rango o azimut del píxel, tanto en la imagen esclava como en la maestra. Luego se realiza el interferograma de las imágenes ajustadas, lo cual necesita de correcciones, dado que dentro de un subswath, cada ráfaga se encontrará separada por una zona de demarcación, en la cual los datos dentro de esta zona pueden conducir a errores. Es por esto que se realiza la corrección de línea, que básicamente consiste en considerar estos valores como nulos e inválidos, juntando cada ráfaga en un subswath. Una vez realizado este procedimiento, el interferograma pasa por un proceso de aplanamiento mediante la eliminación de la fase topográfica que este presenta. Se simula un interferograma basado en un Modelo de Elevación Digital (DEM) de referencia que se resta del interferograma procesado. El producto de este procedimiento resulta en un interferograma con fase topográfica eliminada y una banda para la fase topográfica. Durante esta técnica, el interferograma puede ser perturbado por el ruido de alguna descorrelación temporal o geométrica, volumen de dispersión o procesamiento de error. Por lo cual se procede a realizar una fase de filtro. Para desenvolver de mejor manera esta fase, la relación señal-ruido se incrementa mediante el filtrado de la fase [9][16][17].

Tabla 1. Tipo de órbita donde se obtuvieron las diferentes de imágenes.

FECHA IMAGEN MAESTRA	FECHA IMAGEN ESCLAVA	TIPO DE ÓRBITA
3 de noviembre 2014	27 de noviembre 2014	Ascendente
8 de noviembre 2014	2 de diciembre 2014	Descendente

9 de diciembre 2014	Ascendente
11 de diciembre 2014	Ascendente
14 de diciembre 2014	Descendente
2 de enero 2015	Ascendente

Para realizar un mapa de riesgo, según como lo establece el Instituto Geográfico Nacional, se define riesgo como la expectativa de que se produzcan pérdidas de vidas humanas, bienes materiales o capacidad productiva debido a la actividad volcánica de la isla. Estos peligros volcánicos corresponden a flujos piroclásticos, lava, lahares, dirección y caída de ceniza, además de rasgos topográficos como pendiente y morfología del terreno. Estos riesgos por lo general no constituyen un grave problema a más de 30 km de la fuente. El concepto de peligrosidad volcánica engloba todo el conjunto de eventos que se pueden esperar en un determinado volcán y que pueden provocar daños a personas o bienes expuestos. Por este motivo, generalmente, en un área volcánica activa se elabora un mapa de peligrosidad por cada uno de los peligros esperables en dicha área.

Finalmente, el riesgo se evaluó como el producto de tres factores: valor, vulnerabilidad y peligrosidad, ocupando la siguiente fórmula propuesta por el Instituto Geográfico Nacional:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valor}$$

Donde la peligrosidad se define como la probabilidad de que un lugar, durante un intervalo de tiempo determinado, sea afectado por un determinado evento. La vulnerabilidad es la expectativa de daño o pérdida sobre un determinado elemento expuesto. Y el valor representa la cuantificación, en términos de vidas humanas, de coste, etc. de los elementos susceptibles de ser afectados por el evento.

Para poder realizar todos estos principios, ocupando Quantum Gis 2.8.8 y ArcGis 10.1, se formularon diferentes capas para englobar la peligrosidad, vulnerabilidad y valor. Para los factores de peligrosidad se generaron capas de coladas de lava históricas presentes a los alrededores del volcán. Para los factores vulnerabilidad se generaron capas de pendiente y relieve del volcán, adhiriendo además el interferograma que se obtuvo. Finalmente, para los factores de valor o factor social, se generaron capas de uso de suelo. Una vez generadas las capas, utilizando el programa ArcGis 10.1, se continúa realizando la fórmula descrita anteriormente, mediante álgebra de mapas, ocupando la calculadora ráster.

4. Resultados.

4.1 Interferometría

Aplicando las técnicas necesarias para poder realizar los diferentes interferogramas en el programa SNAP, se obtuvieron seis interferogramas representados como mapas de la misma zona (**Figura 4**), estudiados en diversos períodos pre eruptivo y eruptivo comprendidos entre noviembre del 2014 y enero del 2015. Como se mencionó en la metodología, se toman dos imágenes maestras correspondientes al 3/11/2014 y 08/11/2014, de órbita ascendente y descendente respectivamente, que finalmente nos permitirá trabajar con las imágenes esclavas de misma órbita que las maestras (**Tabla 1**).

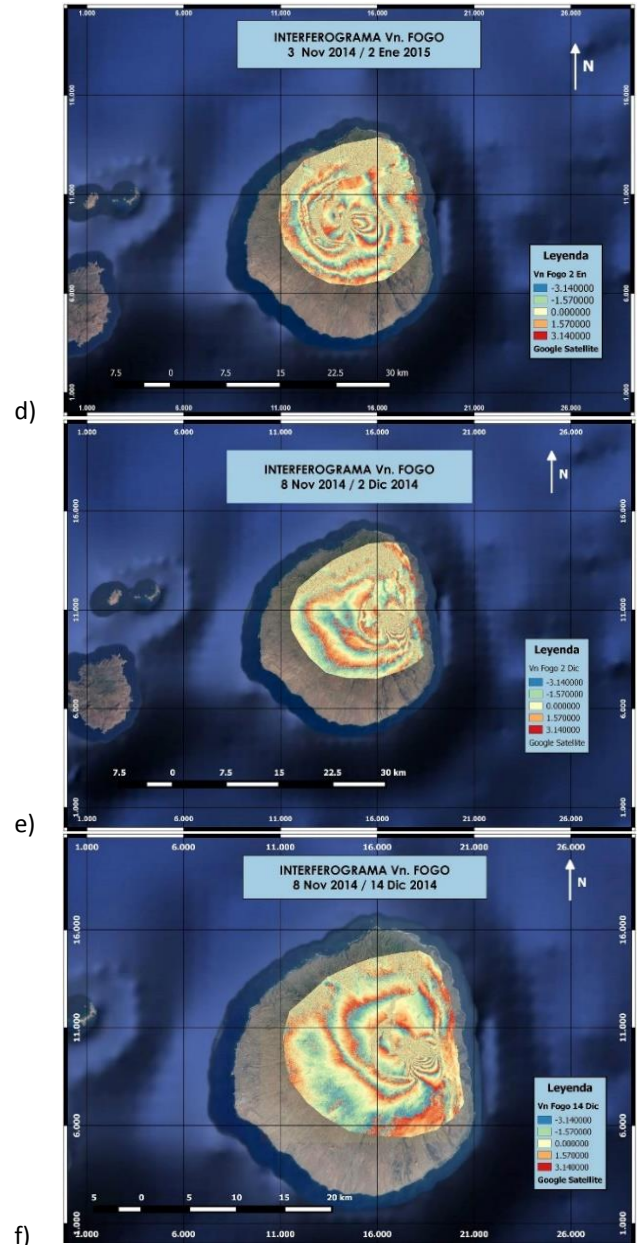
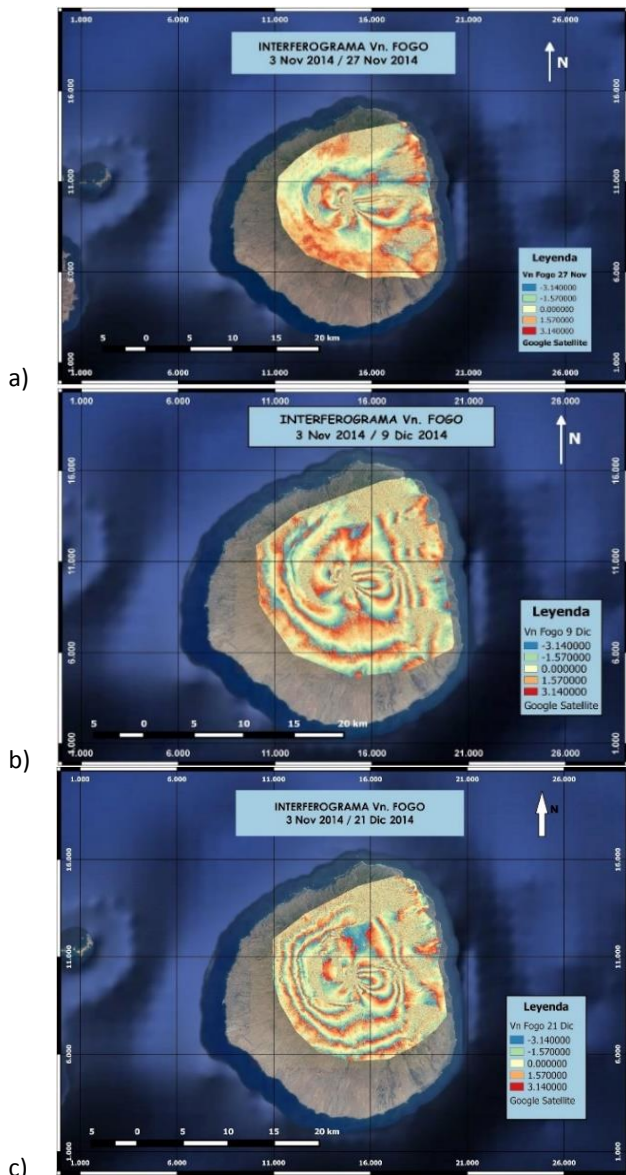


Figura 4. Mapas referenciales, donde se aprecia el interferograma del Volcán en diferentes fechas: (a) Entre las fechas 3/11/14 y 27/11/14. (b) Entre las fechas 3/11/14 y 9/12/14. (c) Entre las fechas 3/11/14 y 21/12/14. (d) Entre las fechas 3/11/14 y 2/01/15. (e) Entre las fechas 8/11/14 y 2/12/14. (f) Entre las fechas 8/11/14 y 14/12/14.

La morfología de los interferogramas nos indica una tendencia en forma de lóbulos en la sección central del volcán. En los mapas b, c y d, las franjas de interferencia (fringes) se encuentran bien definidos apreciándose la forma de este lóbulo. Sin embargo, el mapa (c) posee fringes más intensificados, tanto en definición de límites como en número de repetición. Estos lóbulos son llamados coloquialmente “mariposa”, los que varían en tamaño,

mostrando una clara disminución en el mapa (d). Los mapas (e y f) muestran un desplazamiento de esta "mariposa" hacia el lado este del volcán. Este desplazamiento se produce porque las imágenes fueron procesadas con distinta órbita (Tabla 1). En la imagen (f), la estructura del interferograma está difusa, por lo que difícilmente se aprecia la "mariposa" y los fringes.

Cabe destacar que en todos los mapas se observan regiones con baja coherencia espacial atribuibles a ruidos o errores espaciales en la medición (ejemplo en zona norte del mapa c). No obstante, las zonas con ruido varían levemente, observándose mayor ruido en los mapas (d y e), respecto a las demás.

4.2. Delimitación del riesgo volcánico.

Una vez obtenidos los interferogramas, se delimitó la susceptibilidad ante un peligro volcánico. Se generaron modelos para englobar la peligrosidad, vulnerabilidad y valor. Para la peligrosidad se obtuvo una capa de coladas de lava históricas presentes en los alrededores del volcán. Para vulnerabilidad se obtuvieron capas de pendiente, relieve del volcán, adhiriéndole un interferograma. Finalmente, para el valor o factor social, se generaron capas de uso de suelo. Debido a lo anterior, se consideran aquellas zonas susceptibles a contacto con flujos de lava, teniendo en cuenta además pendientes abruptas, fisuras actuales y cercanías a centros poblados.

Una vez procesada esta información, se obtuvo un esquema de riesgo volcánico (Figura 5), y que en el cual se proponen cuatro zonas de riesgo catalogadas para el Volcán Fogo las que corresponden a Zona de Riesgo Alto (Rojo), encontrada a los alrededores del volcán y que indican zonas susceptibles a pendientes abruptas, fisuras actuales y contactos con flujos de lava; Zona de Riesgo Moderado Alto (Naranja), encontradas mayoritariamente al norte de la isla y que indican zonas donde es posible que existan desvíos de un futuros flujos de lava; Zona de Riesgo Moderado Bajo (Amarillo), encontrados al NW y SW del cono volcánico y que indican que estas zonas podrían ser afectados eventualmente por los factores anteriormente mencionados; Zona de Riesgo Bajo (Verde), encontradas en su mayoría en la zona SW de la isla y que indican zonas que están protegidas de algún flujo de lava, donde no existen pendientes abruptas y presencia de fisuras actuales.

Cabe destacar que el mapa de riesgo obtenido es netamente exploratorio, ya que se necesitan más antecedentes del lugar para que se puedan describir y visualizar los riesgos de manera más óptima.

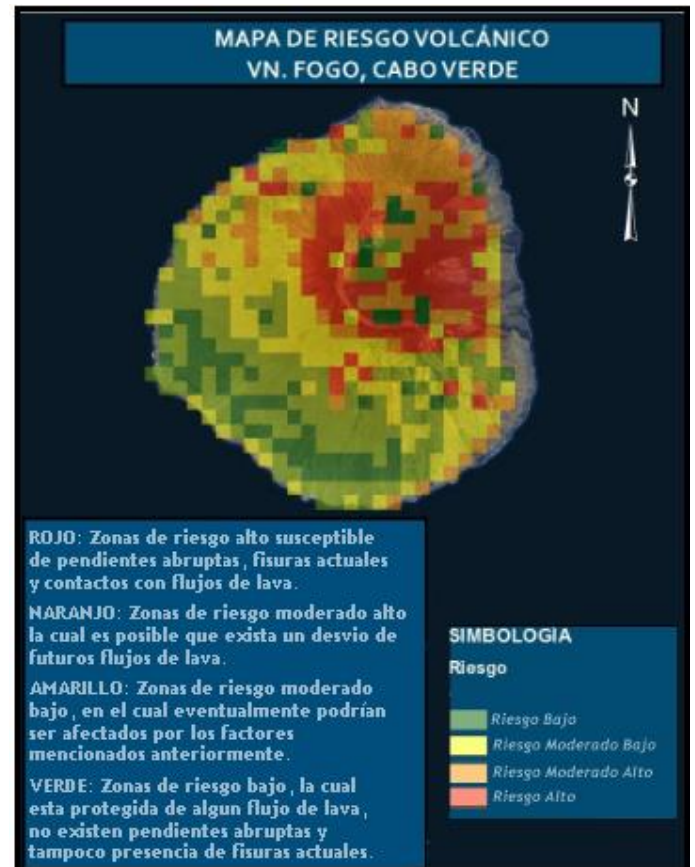


Figura 5. Mapa exploratorio de riesgo volcánico, para el volcán Fogo de Cabo Verde.

5. Análisis y Discusión

5.1 Interferometría

El ruido observado en los mapas generados se debe a que dichas zonas experimentan baja coherencia, lo cual hace que las franjas de interferencia tengan un alto grado de incerteza [17]. Acorde a registros históricos, la zona noreste posee depositación de lavas con superficies altamente rugosas. Los valores de baja coherencia por lo general están asociado a cambios bruscos del relieve o rugosidad [14], lo cual puede ser consistente con depósitos de lavas. A pesar de lo anterior, el área de subsidencia es correctamente observada a diferencia de otros trabajos como el de Remy et al., [21], en la cual no se puede obtener una buena apreciación de los fringes asociados a procesos de deformación cortical.

Los resultados interferométricos del 3 a 27 de noviembre de 2014 (Figura 4.a) muestran una estructura conformada por 2-3 lóbulos apreciables, lo que reconocemos como un patrón mariposa y que es consistente con otros estudios de la zona [11]. La mayor



deformación de esta se debería presentar el interferograma en la **Figura 4d**, debido a que aquí se representa la deformación que transcurrió a lo largo de todo el proceso eruptivo, además de poseer una imagen con bajos niveles de ruido granular (speckle) lo cual permite identificar fringes.

Este patrón mariposa podría estar indicando la presencia de una falla. Sin embargo y considerando que se tiene conocimiento de al menos tres fallas cercanas al cono volcánico, se estima más apropiado hablar de una zona de falla en dicha región, ya que no se sabe con certeza si corresponde a alguna de las fallas ya registradas o a una posible falla incipiente, que podría estar muy relacionada con la última erupción del volcán. Por lo cual, un trabajo in situ junto a un nuevo estudio satelital, serían muy favorables para el análisis de las pasadas y actuales estructuras morfológicas presentes en el volcán, además de que permitirían generar un bosquejo más actualizado de éstas.

5.2 Delimitación Del Riesgo Volcánico

Los poblados Portela y Bangaeira ubicados al Noroeste y Oeste del volcán, son los más cercanos a este macizo volcánico. La permanencia de estos poblados llama profundamente la atención ya que, a pesar de las erupciones pasadas, se siguió poblando los alrededores del volcán. Durante la erupción de 2014 se produjo la destrucción de estas ciudades por parte de coladas de lava proveniente de un cono adventicio en la ladera oeste del volcán donde la ciudad de Portela y Bangaeira fueron destruidas en un 100% y 70% respectivamente, como lo mencionan Gomes en su reporte [10]. Por lo cual, generar un mapa de riesgo, ayuda a la delimitación de zonas seguras que este podría tener en caso de otra erupción y de una posible reconstrucción de viviendas en la zona.

Las zonas verdes que se registran a los alrededores del cono volcánico y adventicio, nos indican coladas de lavas históricas, que al observar detalladamente en la **Figura 3**, muestran que las recientes coladas de lava bordearon las más antiguas, por lo cual esta podría ser una zona más cercana y segura para los pobladores. Cabe mencionar, como se explicó anteriormente, que este es un mapa netamente exploratorio, por lo que, observaciones in situ serían ideales para la generación de un óptimo y eficiente mapa de riesgos.

Se debe mencionar además, que esta isla no presenta zona de seguridad, dado que si consideramos lo establecido por el Instituto Geográfico Nacional para la creación de un mapa de riesgo, se indica una zona segura o libre de riesgo en un radio de 30 km, y la isla tiene un diámetro de 22 km, lo que la ubica completamente en una zona de riesgo.

6. Conclusiones.

Contar con un mapa de riesgos volcánicos es primordial, debido a la cantidad de daños que puede producir un volcán; he aquí la importancia de realizar uno. Esto proporciona a la comunidad conocimiento de los peligros existentes cerca del volcán, ayudando a que se tomen medidas preventivas con respecto a esto, como por ejemplo, considera las zonas de riesgo al momento de construir edificaciones, señalar un área de seguridad, vías de evacuación, etc.

Los métodos y herramientas que se llevaron a cabo en esta investigación, contribuyeron a cumplir el objetivo esperado, como lo fue la creación de interferogramas, donde se pone en manifiesto que existen zonas de deformación cortical asociado a un evento volcánico [21], siendo la más característica el patrón “mariposa”, lo que indica claramente la presencia de una falla. Teniendo en cuenta esta información, además de factores como coladas de lavas históricas, pendiente, relieve y uso de suelo, fue posible delimitar las zonas propensas a riesgo, obteniendo así un mapa exploratorio.

Como se ha mencionado anteriormente, se necesita mayor información del lugar para poder delimitar de mejor manera los riesgos asociados a este volcán, producto de algunos errores que se puedan observar en el mapa exploratorio de riesgos. Además, se debe mencionar que es complicado, en esta instancia, definir si esta falla fue producto de la erupción del año 2014 o es una falla ya registrada, debido a que no se tienen datos ni registros in situ para poder estimar o corroborar esta información. Por lo cual, se propone un análisis satelital más robusto además de un registro detallado del lugar, para poder definir lo que ocurre estructuralmente en este sector y poder delimitar la susceptibilidad que presenta esta isla, ante los riesgos que puede producir este volcán.

7. Agradecimientos.

Los autores agradecen la amabilidad de Rodrigo Santander Massa, por la ayuda entregada al momento de realizar el mapa exploratorio de riesgo volcánico y el intercambio de conocimiento que puede proporcionar la interferometría en el campo de la geofísica.

8. Referencias.

- [1] Brum da Silveira, A., Madeira, J., Serralheiro, A. (1997). A estrutura da Ilha do Fogo, Cabo Verde. A Erupção Vulcânica de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde. Publ. IICT, Lisboa: pp.63–78.



- [2] Brum da Silveira, A., & Madeira, J. (2006). Morphology and Structure of Fogo Island (Cape Verde): new data. In VII Congresso Nacional de Geologia (p. 682). Evora: Universidade de Evora.
- [3] Campbell, J., & Wynne, R. (2011). Introduction to remote sensing (1st Ed.). New York [u.a.]: Guilford.
- [4] Carracedo, J., Fra-Paleo, U., Rodríguez Badiola, E., Pérez Torrado, F., Paris, R., & Guillou, H. et al. (2006). Los volcanes del Parque Nacional del Teide (1st ed., p. Cap.12). [Madrid]: Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- [5] Devey, C., Lackschewitz, K., Mertz, D., Bourdon, B., Cheminée, J., & Dubois, J. et al. (2003). Giving birth to hotspot volcanoes: Distribution and composition of young seamounts from the seafloor near Tahiti and Pitcairn islands. *Geology*, 31(5), 395. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0395:gbthvd>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0395:gbthvd>2.0.co;2)
- [6] Department of Regional Development (1990). Disaster, Planning and Development: Managing Natural Hazards to Reduce Loss. (1st ed.). Washington, D.C.
- [7] DIVA-GIS, (n.d). Download data by country, Diva-gis.org. <http://www.diva-gis.org/gdata>. Accesado por última vez el 4 de agosto del 2016.
- [8] Elsworth, D. & Day, S. (1999). Flank collapse triggered by intrusion: the Canarian and Cape Verde Archipelagoes. *Journal of Volcanology And Geothermal Research*, 94(1-4), 323-340. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-0273\(99\)00110-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00110-9).
- [9] Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (1st ed., p. A-14). Noordwijk: ESA. ISBN: 92-9092-233-8.
- [10] Gomes, F. (2014). El volcán Fogo se come el pueblo de Portela en Cabo Verde. *El Huffington Post*. http://www.huffingtonpost.es/2014/12/08/flocan-fogo-cabo-verde_n_6287570.html
- [11] González, P., Bagnardi, M., Hooper, A., Larsen, Y., Marinkovic, P., Samsonov, S., & Wright, T. (2015). The 2014-2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9239-9246. <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl066003>
- [12] Harris, D. (2012). Mapa de Riesgo de evaluación del Monte Merapi, en Java Central, Indonesia mediante teledetección. *Terremoto-Report*, 1(2). <http://es.earthquake-report.com/2012/01/11/hazard-map-assessment-of-mount-merapi-central-java-indonesia-using-remote-sensing/>
- [13] Instituto Geográfico Nacional (n.d). Peligrosidad y riesgo volcánico. Ign.es. Obtenido de <https://www.ign.es/ign/layoutIn/peligrosidad.do>. Accesado por última vez el 11 de agosto del 2016.
- [14] Kümmerlin, I. (2001). EL RADAR ISAR (Radar de Apertura Sintetica Inversa) (1st ed., p. 4). Obtenido de <http://revistamarina.cl/revistas/2001/4/Kummerlin.pdf>
- [15] Lara, L., & Calderón, R. (2015). Peligro y riesgo específico asociado al volcán Chaitén: perspectiva geológica de la vulnerabilidad en el entorno de un volcán activo. *Magallania (Punta Arenas)*, 43(3), 27-35. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-22442015000300003>
- [16] Massonnet, D., and K. L. Feigl (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36, 441–500, doi: 10.1029/97RG03139.
- [17] Massonnet, D., and F. Sigmundsson (2000), Remote sensing of volcano deformation by radar interferometry from various satellites, in *Remote Sensing of Active Volcanism*, *Geophys. Monogr.* Edited by P. Mouginiis-Mark, J. A. Crisp, and J. H. Fink, pp. 207–221, AGU, Washington, D. C.
- [18] Massonnet, D., & Souyris, J. (2008). *Imaging with synthetic aperture radar* (1st ed., p. 180). Boca Raton, FL: CRC.
- [19] Perez-Torrado, F., Moreno Medina, C., Rodriguez-Gonzalez, A., Carracedo, J., Nesky Rodrigues, A. and Dinis, H. (2015). La erupción de Fogo (Cabo Verde) de 2014-15. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, [online] 23(1), p.122. <http://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/298966/388240>.
- [20] Ramalho, R., Winckler, G., Madeira, J., Helffrich, G., Hipolito, A., & Quartau, R. et al. (2015). Hazard potential of volcanic flank collapses raised by new megatsunami evidence. *Science Advances*, 1(9), e1500456-e1500456. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500456>
- [21] Remy, D., Y. Chen, J. L. Froger, S. Bonvalot, L. Cordoba, and J. Fustos. (2015). Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile). *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3870–3879. doi:10.1002/2015GL063872.



- [22] Rodríguez López, M., Piñeiro Sánchez, C., & de Llano Monelos, P. (2013). Mapa de Riesgos: Identificación y Gestión de Riesgos. *Revista Atlántica De Economía*, 2(1)
- [23] Sellés, Daniel, Rodríguez, A. Carolina, Dungan, Michael A., Naranjo, José A., & Gardeweg, Moyra. (2004). Geochemistry of Nevado de Longaví Volcano (36.2°S): a compositionally atypical arc volcano in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 293-315. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200008>
- [24] Sernageomin. (2016). Mapas de amenaza o riesgo volcánico. Red de vigilancia volcánica | Sernageomin. [Online]. <http://www.sernageomin.cl/volcanes-mapas.php>.
- [25] Veci, L. (2016). SENTINEL-1 Toolbox; SAR Basics Tutorial (1st Ed.). Array Systems Computing Inc. <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>