

Jorge Aguilar¹
Raúl Hernández²
Daniel Carrasco³
Rosana Romero⁴

INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL (INSAR) EN TUNGURAHUA Y GALÁPAGOS

- 1 Escuela Politécnica Nacional. Departamento de Geofísica, Quito.
- 2 CLIRSEN. Quito.
- 3 INDRA-España.
- 4 Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM) Fac de CC.

Resumen

Con el objetivo de observar posibles deformaciones en el volcán Tungurahua y en las islas Galápagos, se seleccionaron imágenes satelitales tomadas entre 1992 y 2000 correspondientes a las misiones ERS1 y ERS2 obteniéndose 12 interferogramas para Galápagos y 7 para Tungurahua. Para el caso del volcán Tungurahua, se observa una aparente deformación de menos de 1.5 cm que no puede ser verificado por la falta de coherencia debido a la caída de ceniza para imágenes después de enero de 1999. Para Galápagos, el DEM utilizado presenta errores especialmente en la zona del volcán Cerro Azul, sin embargo, se observa hundimiento en los volcanes Fernandina y Alcedo y levantamiento en el volcán Sierra Negra

Abstract

In order to observe deformation in Tungurahua volcano and in the Galapagos Islands, we selected satellite imagery between 1992 and 2000, from ERS1 and ERS2 missions. From these, we got 12 interferograms from Galapagos zone and 7 from Tungurahua zone. In the case of Tungurahua, some deformation of 1.5 cm was observed but it was not possible to confirm because the lack of coherence in the images after January 1999 due to ash fall. In Galapagos, DEM from Cerro Azul has problems, but in Fernandina and Alcedo volcanoes, it is possible to observe some subsidence and in Sierra Negra volcano, some uplift

jaguilar@igepn.edu.ec

INTRODUCCIÓN

Un radar es un instrumento para medir distancias, en su forma más simple este opera difundiendo un pulso de energía electromagnética, si tal pulso encuentra algún objeto, parte de la energía regresa a la antena del radar. Los instrumentos de radar pueden usarse para formar imágenes de la superficie de la tierra al analizar los ecos que retornan del suelo gracias a los potentes pulsos de radio emitidos por el radar. Diferente a los sensores ópticos, las señales registradas por instrumentos radar son coherentes abarcando tanto las medidas de amplitud y fase. La amplitud registra la intensidad del eco o reflectividad del suelo, la fase relaciona la distancia de ida y vuelta de la onda de radio desde el satélite a la tierra y el cambio de fase introducido por la deformación del terreno. La interferometría se basa en la comparación precisa de las fases de las dos imágenes radar, píxel por píxel. Un interferograma es una imagen de la diferencia de fase entre las dos imágenes radar.

Un sensor radar a 800 km sobre la tierra detecta pequeños cambios midiendo las muy pequeñas diferencias en los retardos de tiempo, o fase, del eco del radar. Esta diferencia se ve afectada por la topografía, las perturbaciones atmosféricas y por desplazamientos del terreno que pueden haber ocurrido entre cada una de las observaciones. Si se adquiere una segunda imagen radar de la misma área de terreno un tiempo posterior, al comparar los ecos radar de cada punto sobre la superficie en cada imagen, deberíamos esperar que la segunda imagen sea la misma que la primera si el terreno no ha cambiado entre las observaciones. Si el terreno ha cambiado de posición en el tiempo entre la toma de las imágenes, la señal de la segunda imagen se retrasará en un tiempo proporcionalmente la diferencia en la posición. Se mide el retardo en el tiempo, examinando las fases de los ecos, usualmente se puede estimar los retardos desde 1/10 a 1/100 de la longitud de onda. La longitud de onda para ERS1 y ERS2 es de 5.6 cm, por lo que potencialmente se pueden detectar movimientos del orden de los milímetros.

Es muy difícil en la práctica asegurar que la plataforma radar retorne exactamente a la misma posición, por lo tanto, veremos la superficie desde una posición cercana a la posición inicial, esto resulta en alguna distorsión o paralaje en cada interferograma, como ventaja adicional este desplazamiento es invertible para recobrar la topografía desde el interferograma. En otras palabras, en un interferograma generalmente tendremos efectos de topografía y movimiento, por lo que quitando la topografía dejamos solo el movimiento.

VOLCÁN TUNGURAHUA

El volcán Tungurahua, uno de los volcanes más activos de Ecuador, con 5023 m de altura snm, está localizado a 9 km al SSW de la ciudad de Baños. Este volcán ha experimentado 17 erupciones desde 1532, algunas de ellas acompañadas de emisiones de lava, flujos picoclásticos y caídas de tefra (Hall *et al.*, 1999)

El estudio del volcán Tungurahua con INSAR se limita al período desde 1992 al 2001 (período de vida del sistema ERS) y en estos años la actividad del volcán la podemos resumir como sigue a continuación.

En enero de 1993 se registra un tremor volcánico, en abril y mayo de 1994 se da un incremento de la actividad tremórica del volcán y para octubre del mismo año se registran decenas de micro sismos.

Un segundo período de actividad importante se da en 1999, iniciándose con un incremento en la amplitud del tremor. Para mayo un pequeño enjambre de sismos volcano-tectónico de origen superficial y en julio eventos de largo período a 6-7 km de profundidad, asociados a una fase de alimentación magmática y para agosto este mismo tipo de eventos entre 7 a 9 km fueron característicos, además se registraron los primeros valores anómalos de SO₂ (Molina, 2001).

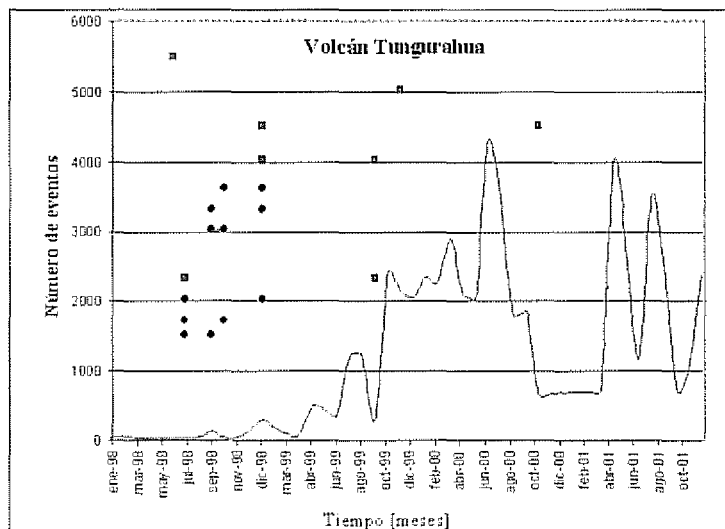


Figura 1. El gráfico muestra la actividad sísmica juntamente con los pares de imágenes como círculos y cuadrados. Para aquellas pares cuya primera imagen corresponde a los años antes de 1998, solo aparece la fecha correspondiente a la segunda imagen (a partir del nivel 5000). Los círculos corresponden a las imágenes que tienen coherencia; los cuadrados a aquellas que no tienen coherencia.

Desde octubre del 2000 hasta mayo del 2001 el Volcán Tungurahua presentó una actividad sísmica moderada caracterizada por esporádicas emisiones ocurridas en marzo, abril y mayo. Esta se incrementó notablemente a fines de mayo, y a principios de agosto y septiembre. En forma general, estos picos se caracterizaron por la degasificación del magma a través de explosiones y emisiones de vapor y ceniza. Estas emisiones arrojaron ceniza a grandes distancias del volcán. (Departamento de Geofísica, 2002)

Se seleccionaron imágenes que coincidían justamente con estos períodos de actividad volcánica, tomando además imágenes con orbitas descendentes, para favorecer la visión del edificio joven (área de las últimas erupciones). De esta forma, los pares de imágenes seleccionados se presentan en la tabla 1.

No fue posible disponer de una imagen de 1995, que se necesitaba con el objetivo de observar posibles defor-

	23jun92	23oct97	26jun98	31jul98	4sep98	9oct98	22ene99	29oct99	3dic99	17nov00
23jun92		22	14/45?							
23oct97								5		
31jul98					53	85	120	48		
4sep98						36	62			
9oct98							92			
26jun98										
22ene99								40		47

Tabla 1. Interferogramas procesados (12), con sus líneas bases obtenidas después del procesamiento.

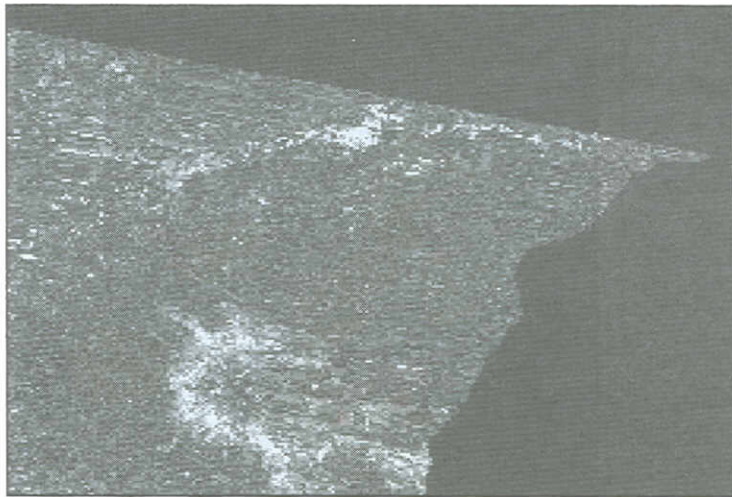


Figura 2. Imagen de coherencia correspondiente al 31jul98-4sep98. Línea base = 53 m y Δ días = 35. Se puede ver buena coherencia. La cima no tiene coherencia debido a la nieve.

maciones asociadas a la actividad de 1994. De todos modos se trabajó con las imágenes del 23 junio de 1992-23 oct. 1997 y 23 junio 1992-26 junio 1998. Todos los interferogramas fueron procesados usando órbitas precisas.

Correlacionando estas imágenes con la actividad sísmica, varias de ellas corresponden al período en el cual se inicia la crisis de 1998-2000. La figura 1 muestra las fechas de los pares de imágenes a un mismo nivel, en círculos están las fechas de los seis pares que tienen coherencia y en cuadrados los cinco que no tienen coherencia. El par de imágenes del período 92-97 no aparecen en el gráfico y no tienen coherencia. En octubre de 1999 se inician las explosiones en el volcán acompañadas de emisiones de ceniza. Para estas fechas los interferogramas no tienen coherencia. La segunda imagen coincide con las fechas de las emisiones de ceniza, lo que explica el porqué de este problema.

Figura 3a. Interferograma Diferencial correspondiente al 31jul98-9oct98. B = 85 m y Δ días = 70.

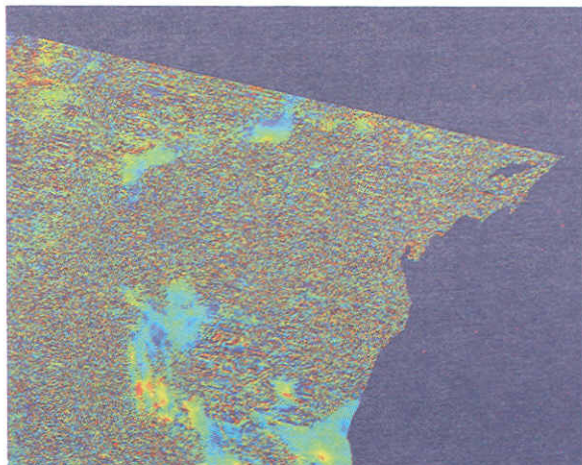
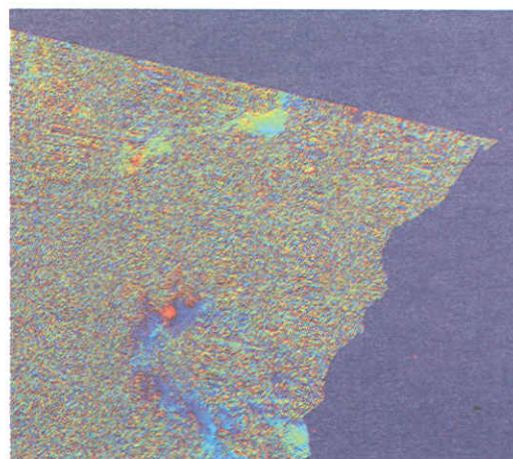


Figura 3b. Interferograma diferencial correspondiente al 9oct98-22ene99. B = 92 m y Δ días = 105.



PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El registro de las imágenes se realizó en forma manual en varios interferogramas debido a que las imágenes del 9oct98, 26jun98 y 29oct99 tienen diferentes desplazamientos respecto a sus pares interferométricos (celdas con sombra en la tabla 1).

RESULTADOS

Coherencia

En general el volcán mantiene una buena coherencia (figura 2) para imágenes de corta separación temporal y pequeñas líneas base como en los interferogramas de 31jul98-4sep98, 31jul98-9oct98, 31jul98-22ene99, 4sep98-9oct98, 4sep98-22ene99, 9oct98-22ene99. Sin embargo durante el período de explosiones la coherencia es muy pobre, debido a que las propiedades del suelo cambian con la frecuente actividad volcánica de emisiones de ceniza y lahares: observando en los interferogramas de: 31jul98-29oct99, 22ene99-29oct99, 22ene99-17nov00. Para los períodos de tiempo muy largos (23jun92-26jun98; 23jun92-26jun98, 23oct97-3dic99), también se pierde coherencia. La cima del volcán Tungurahua (últimos 100 m) no mantiene coherencia debido a la presencia del galciar y la nieve.

Deformación

De los seis interferogramas con coherencia correspondientes al período julio de 1998 enero del 2000 (Figura 3), la pequeña área del volcán Tungurahua que se observa en estos interferogramas es plana, lo que indica que no existe deformación por los sismos de fracturación en el área nor-oeste entre julio y octubre de 1998. La zona roja (más oscura) dentro de la azul, se observa en to-

das las imágenes que concluyen en 01/1999, podría interpretarse como una pequeña deformación de menos de 1.5 cm que no puede ser confirmada debido a la caída de ceniza luego de este período y por tanto a la pérdida de coherencia en las imágenes.

ISLAS GALÁPAGOS

Las Islas Galápagos constituyen un archipiélago conformado por 14 islas principales y muchas otras islas pequeñas e islotes, ubicadas en el Océano Pacífico aproximadamente a 1 000 km al oeste de la costa ecuatoriana. Estas islas se encuentran a una distancia de 1 000 Km. de la dorsal del Pacífico Este, mientras que la distancia que separa el archipiélago de la llamada dorsal de Galápagos, ubicada al norte de las islas es mucho menor (alrededor de 170 km). En este archipiélago se han reconocido 21 volcanes que han emergido del nivel del mar, de los cuales 15 han tenido actividad durante el Holoceno y solo 8 de estos han tenido erupciones en tiempo histórico (Hall, 1977; Simkin y Siebert, 1994) Los volcanes con actividad histórica se encuentran en las islas occidentales del archipiélago, es decir las islas Fernandina, Isabela (volcanes Wolf, Alcedo, Sierra Negra y Cerro Azul), Santiago, Pinta y Marchena.

Criterio para la selección de pares ERS

Para la selección de las imágenes se consideraron los tres tracks (sección de toma de la imagen satelital) diferentes para las islas Fernandina e Isabela, y se escogió el track 61 que cubre tanto las islas Isabela y Fernandina (figura 4).

Las imágenes fueron seleccionadas para tratar de detectar las deformaciones pre, co y post eruptivas (asociadas con las erupciones de 1995 y 1998).

Inicialmente se seleccionaron 8 imágenes pero finalmente solo 7 de ellas sirvieron para el presente estudio (tabla 2).

Procesamiento de las imágenes

Cinco interferogramas diferenciales se obtuvieron a partir de las siete imágenes RAW de las Islas Galápagos, se usó un Modelo Digital del terreno (DEM) de 100 m entre curvas (espaciado) para remover la topografía.

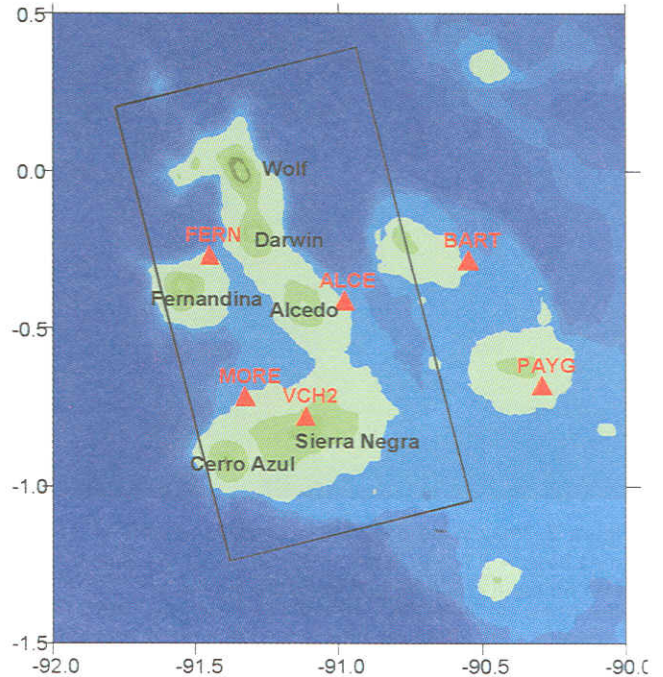


Figura 4. Localización de las Islas Galápagos y sus principales volcanes y estaciones de la Red de Sismógrafos, se muestra además la cobertura del track 61 sobre las islas.

Al procesar las imágenes, se evidenciaron los errores del modelo digital del terreno, por ejemplo el interferograma del 13apr 00-18 may00, línea de base de = 37m y una separación de 35 días fue procesado con órbitas exactas, figura 5.

Este interferograma diferencial tiene 35 días de separación temporal, así que las franjas en él no pueden ser debido a deformación. El área con franjas es la parte del sur de la isla de Isabela, donde es posible ver de 2-3 franjas en Cerro Azul y 3 en la parte sur oriental del Sierra Negra, de esta manera, se confirman los errores en el DEM en ambos volcanes.

Además revisando las otras imágenes se encuentran las siguientes diferencias en el Sur de Isabela.

- La altura máxima (h_{max}) de Cerro Azul según el DEM es 1000 m, cuando la h_{max} verdadera es 1 690 m, así que 700 m no pueden ser reproducidos en el interferograma simulado y por lo tanto aparecerán en el diferencial.

Misión	Fecha	Orbita	Track	Frame	D	Línea Base	Dif. Días
E2	19981031	18452	61	7173	2	0	0
E2	19990320	20456	61	7173	2	6	140
E2	20000617	26969	61	7173	2	-17	595
Misión	Fecha	Orbita	Track	Frame	D	Línea Base	Dif. Días
E1	19920615	4794	140	3627	-7	0	0
E2	19981105	18531	140	3627	-7	-85	2334
E2	20000413	26046	140	3627	-7	-877	2859
E2	20000518	26547	140	3627	-7	-901	2894

Tabla 2. Imágenes seleccionadas para las islas Galápagos.