



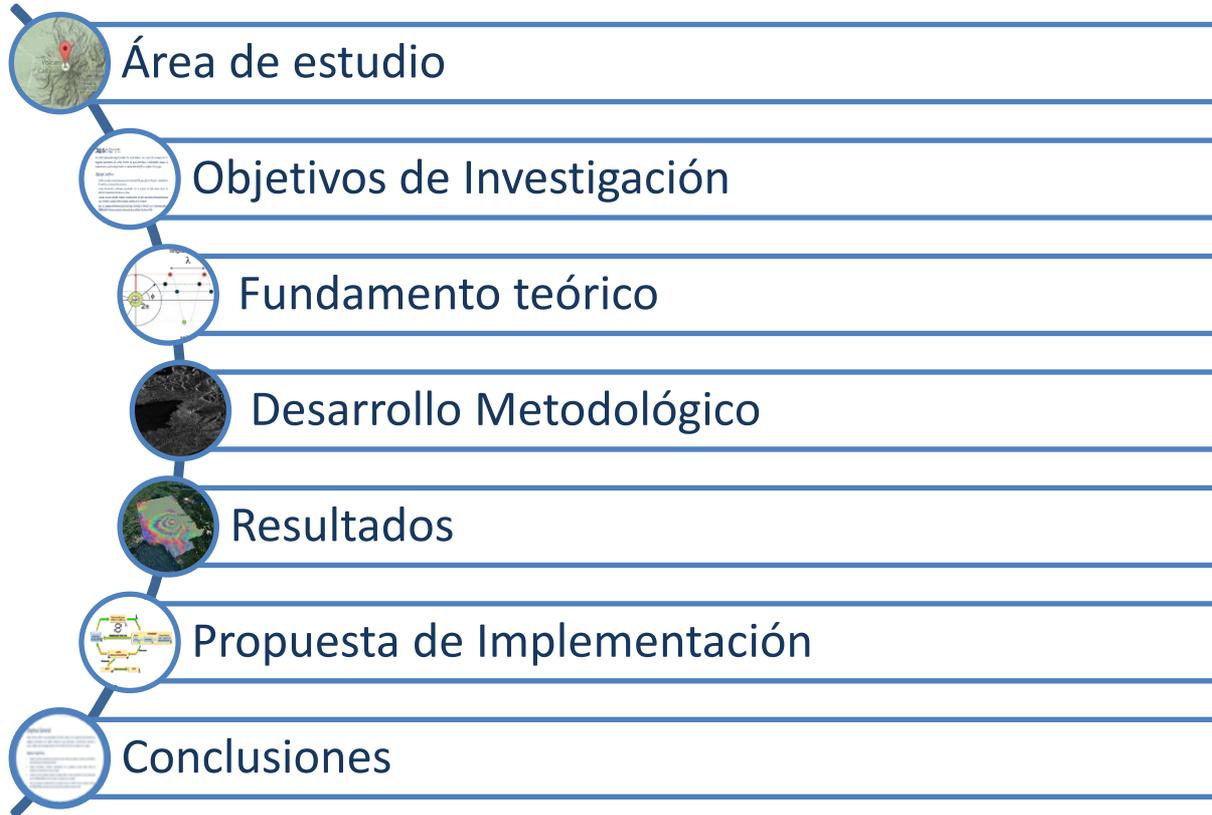
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Academia de Ciencias Aeronáuticas



Interferometría SAR aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcán Calbuco con ayuda de imágenes Sentinel-1A

Autor: David Hermosilla Diaz
Profesor/a: Roxana Trujillo
Rodrigo Suárez
Marcelo Durán

Estructura



Área de Estudio

Laderas y proximidades del volcán Calbuco.

Ubicado en provincia de Llanquihue en la X Región de Los Lagos.

- Altura: 2003 m s. n. m.
- Estratovolcán.
- Cercano a volcán Osorno, Puntagudo y Puyehue.
- 4ta posición en nivel de peligrosidad.
- Cono truncado de perfil irregular.
- Última erupción en 1961, Sub-Plininiana.



Fuente: Google Earth

Objetivos de Investigación

Objetivo General:

Utilizar técnica InSAR en las proximidades del volcán Calbuco con la ayuda del procesamiento de imágenes provenientes del satélite Sentinel-1A, para determinar la deformación asociada al suceso eruptivo que tuvo lugar durante el mes de Abril del 2015 en la región de Los Lagos.

Objetivos Específicos:

- Estudiar teoría física-matemática que sustenta la técnica InSAR, para aplicarla al estudio y entendimiento de la deformación en superficies terrestres.
- Emplear herramientas y softwares especializados con el propósito de poder estimar efectos de subsidencia o levantamiento del área en estudio.
- Comparar los datos obtenidos mediante tecnología InSAR con datos provenientes de otras instituciones como el SERNAGEOMIN con el fin de validar la veracidad de los resultados.
- Idear una propuesta de implementación que integre la técnica de InSAR a la red de monitoreo volcánico del SERNAGEOMIN, reforzando así la observación de la actividad volcánica en Chile.

Fundamento Teórico

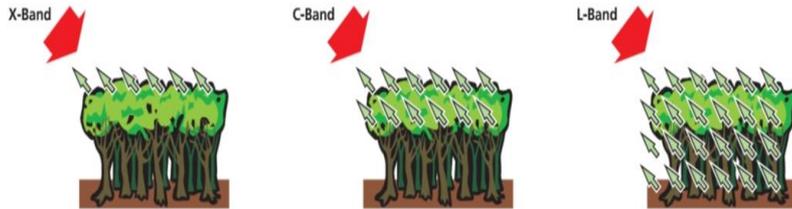
Radar de Apertura Sintética (SAR)

- Radar

- Ofrece su propia iluminación para la toma de imágenes (Teledetección activa):
Funciona de día y de noche, de forma independiente de la luz solar.

- Radiación en el espectro de las microondas:

Es posible atravesar nubes, tempestades y dependiendo de la banda utilizada, áreas foliares o nieve.



Fuente: DLR.

Nombre Banda	Ancho de banda λ (Cm)	Frecuencia f (GHz)
K	0,83-2,75	36-10,9
X	2,75-5,21	10,9-5,75
C	5,21-7,69	5,75-3,9
S	7,69-19,4	3,9-1,55
L	19,4-76,9	1,55-0,39
P	76,9-133	0,39-0,225

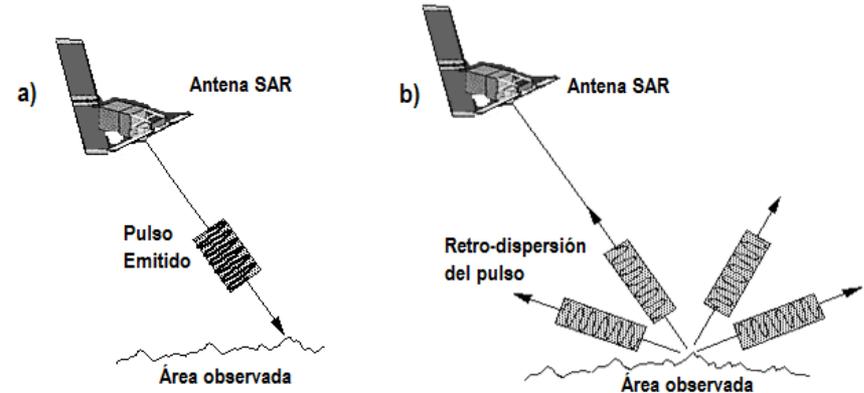
Fuente: Elaboración propia.

Fundamento Teórico

Radar de Apertura Sintética (SAR)

- Concepto básico Radar

- 1.- El Radar emite un pulso de energía (microondas) hacia el suelo.
- 2.- El pulso es esparcido en todas las direcciones.
- 3.- Parte de este pulso retorna en dirección de la antena receptora del radar (*Retro-dispersión*)
- 4.- Este pulso es captado en función de su amplitud, fase, tiempo de retorno y polarización.
- 5.- Estos parámetros son procesados en conjunto, para formar una imagen de la superficie capturada.

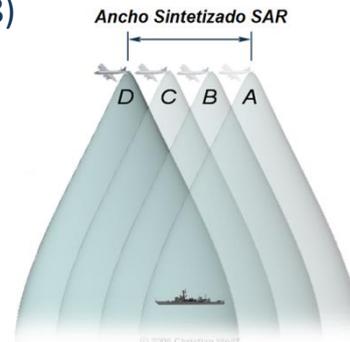


Fuente: Centre for Remote Imagin, Sensing & Processing (CRISP).

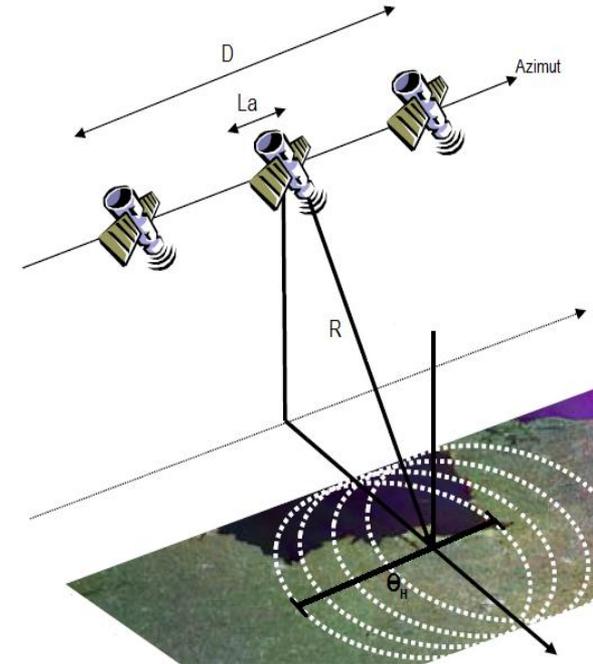
Fundamento Teórico

Radar de Apertura Sintética (SAR)

- Funcionamiento básico SAR
 - “SAR es un proceso en donde se almacenan todas las señales retornadas, con sus respectivas amplitudes y fases durante el tiempo T , desde la posición A a la D. Como el cono de observación se desplaza a lo largo de la trayectoria del sensor, una apertura sintética es generada por esta señal. Cuando T es grande, la apertura de la antena también lo es, logrando una resolución mayor” (Christian Wolff, 2008)



Fuente: Christian Wolff.



Fuente: Carlos López

Fundamento Teórico

Radar de Apertura Sintética (SAR)

- Resolución de sensores SAR

-En Alcance o Rango:

$$\rho_A \approx \frac{c}{2B}$$

c : Vel. Luz en m/s

B : Ancho de banda en MHz

-En Azimut:

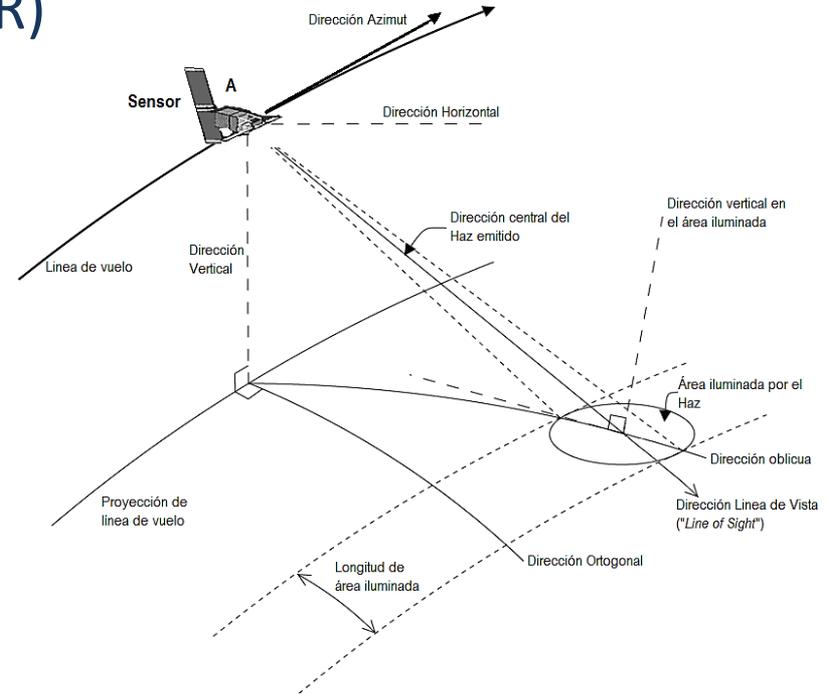
$$\rho_{Az} = \frac{La}{2}$$

La : Longitud física de Antena

Resolución en azimut para sensor RAR:

$$\rho_{Az} = \frac{R\lambda}{La}$$

R : Distancia Sensor-Objeto

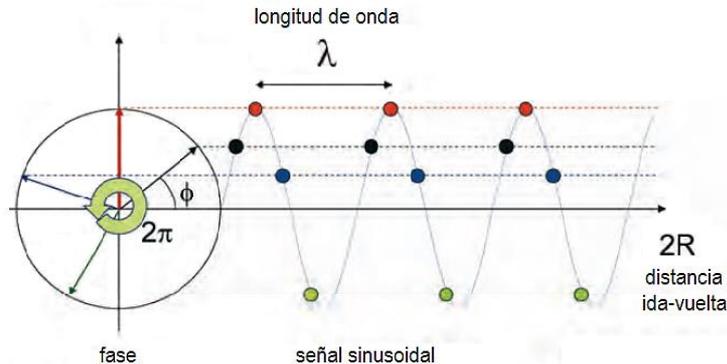


Fuente: Traducido desde trabajo de Felipe Geremia Nievinski.

Fundamento Teórico

La imagen SAR:

- Componente Amplitud
 - Intensidad de la retro-dispersión de la superficie, se observa en escala de grises.
 - Depende de la rugosidad, composición química y propiedades dieléctricas del terreno.
- Componente Fase
 - Ondas electromagnéticas que describen un movimiento sinusoidal.



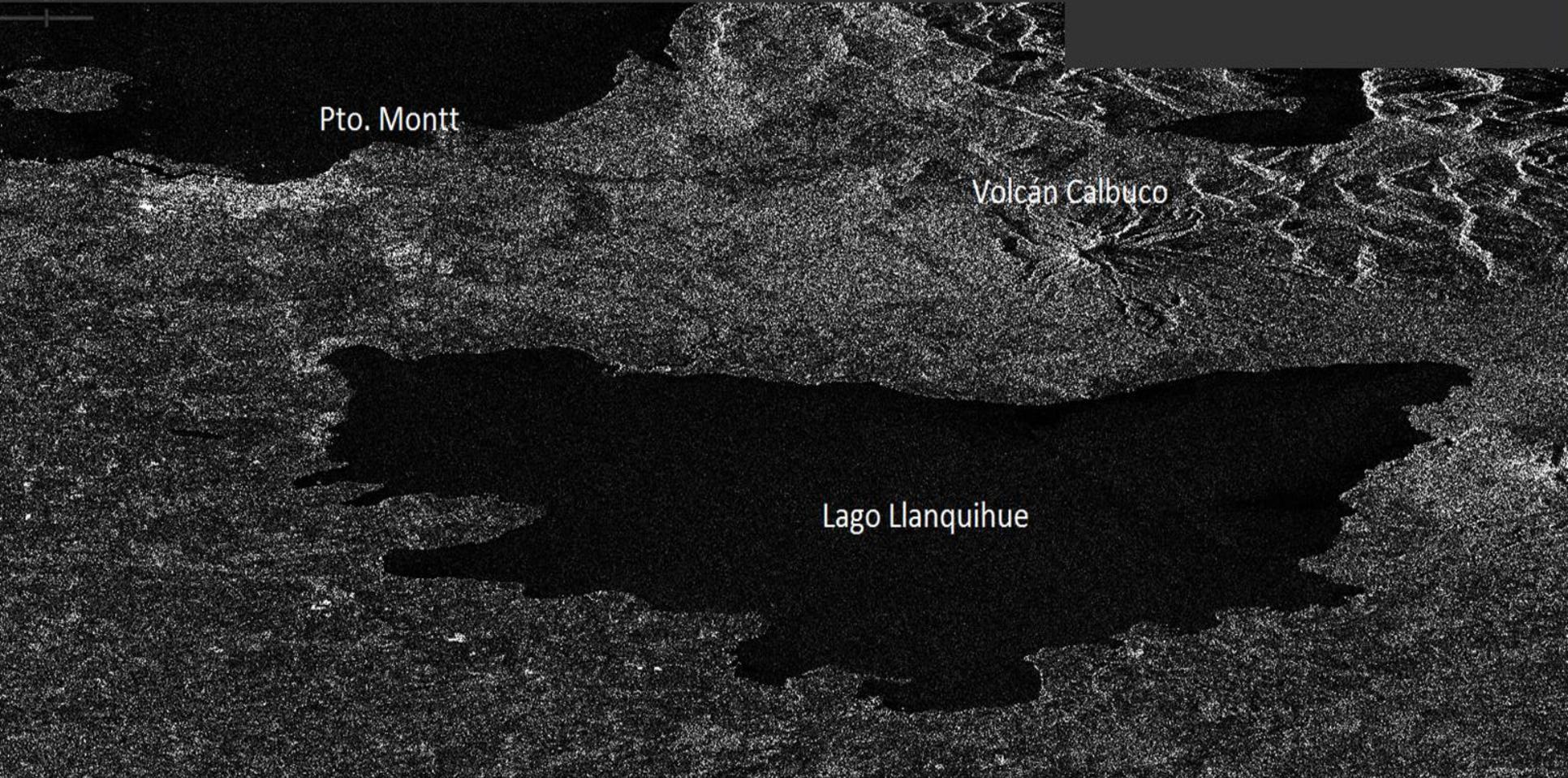
Fuente: ESA.

Cada vez que la partícula recorre una distancia igual a la longitud de onda λ , se dice que recorrió un ciclo igual a 2π .

$$\phi = -\frac{2R}{\lambda} 2\pi$$



Amplitud en imagen SAR



Fundamento Teórico

Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR)

- Interferometría: “Medición de la Interferencia” entre las señales de Imagen 1 (Main) e Imagen 2 (Slave).

La diferencia de fase entre dos pixeles vecinos de dos imágenes es igual a:

$$\underbrace{\Delta\phi}_{\text{Dif.de fase total}} = - \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} s}{\lambda R \tan\theta}}_{\text{comp.oblicua}} - \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \text{sen}\theta}}_{\text{comp.altura}} + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} d}_{\text{mov}} + \phi_{\text{ruido+atm}}$$

B_{\perp} : Línea de Base perpendicular entre ambas capturas

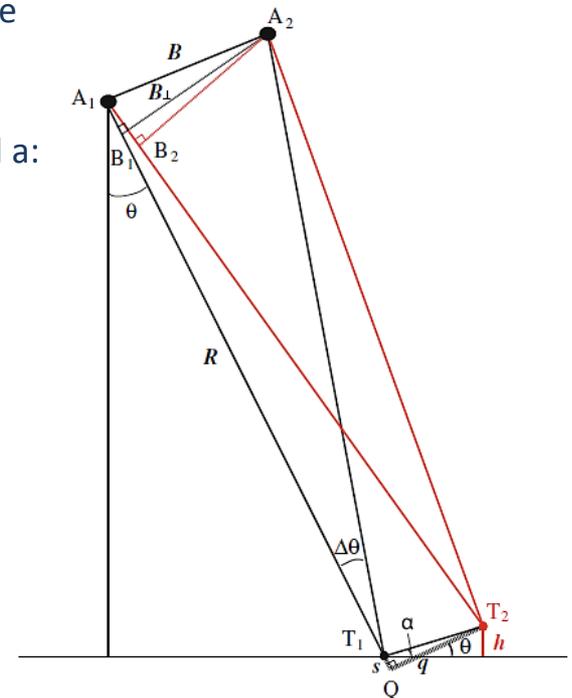
s : Resolución en rango

R : Distancia sensor-objeto

θ : Ángulo de incidencia

h : Diferencia de altura

d : Movimiento relativo en dirección Línea de Visada (LOS)



Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.

Fundamento Teórico

Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR)

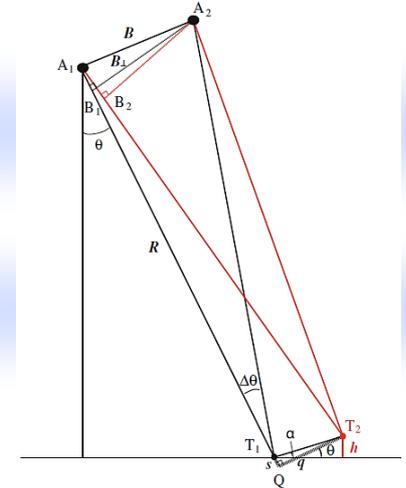
- Fase Interferométrica está compuesta de tres factores elementales:

$$\underbrace{\Delta\phi}_{\text{Dif.de fase total}} = - \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} s}{\lambda R \tan\theta}}_{\text{comp.oblicua}} - \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \text{sen}\theta}}_{\text{comp.altura}} + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} d}_{\text{mov}} + \phi_{\text{ruido+atm}}$$

$$1.- \underbrace{\Delta\phi}_{\text{Dif.de fase total}} = - \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \text{sen}\theta}}_{\text{topografía}} + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} d}_{\text{mov}} + \phi_{\text{ruido+atm}} \longrightarrow \text{Creación DEM}$$

$$2.- \underbrace{\Delta\phi}_{\text{Dif.de fase total}} = \underbrace{\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \text{sen}\theta}}_{\text{DEM}} + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda} d}_{\text{mov}} + \phi_{\text{ruido+atm}} \longrightarrow \text{Movimiento}$$

$$\longrightarrow \underbrace{\Delta\phi_{\text{DInSAR}}}_{\text{Mov}} = \Delta\phi_{\text{total}} - \underbrace{\phi_{\text{topografía}}}_{\text{DEM}}$$



Fundamento Teórico

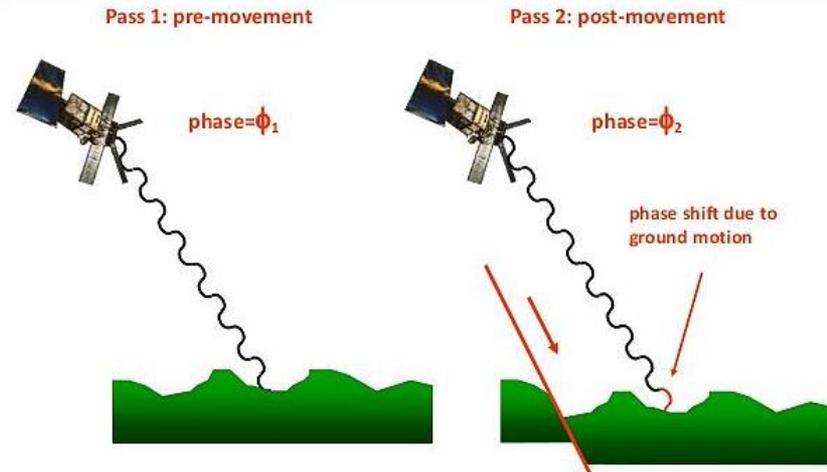
Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR)

- Interferometría Diferencial SAR (DInSAR):

$$\underbrace{\Delta\phi_{DinSAR}}_{Mov} = \Delta\phi_{total} - \underbrace{\phi_{topografia}}_{DEM}$$

→ Movimiento

Al realizar la diferencia entre la fase interferométrica total y la altura topográfica proporcionada por un DEM, se obtiene la fase interferométrica diferencial equivalente al movimiento superficial en LOS.



Fuente: NASA

Fundamento Teórico

Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR)

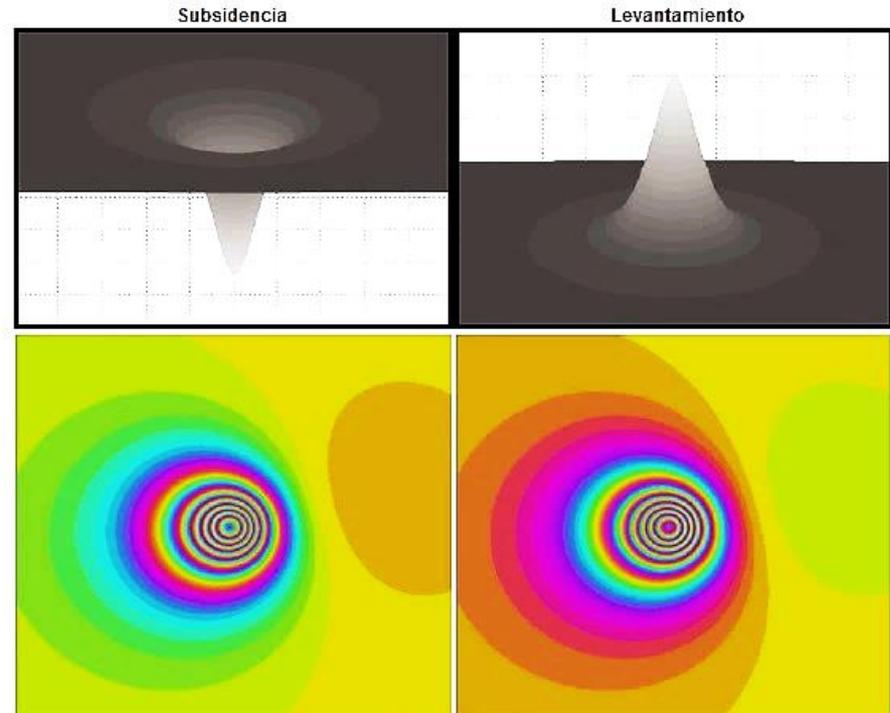
- Interpretación del Interferograma:

1.- Observar patrón de cambio en colores de anillos desde afuera hacia adentro.

2.- Si el patrón se mueve en dirección opuesta al cambio de fase, indica que la superficie se *acerca* hacia el sensor, revelando un Levantamiento.

3.- Si los colores se mueven en la misma dirección que el cambio de fase, indica que la superficie se *aleja* del sensor, revelando un hundimiento de la zona o subsidencia.

4.- Cada ciclo completado representa $\lambda/2$ en LOS.



FUENTE: Zhong Lu, Daniel Dzurisin. "InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes".

Fundamento Teórico

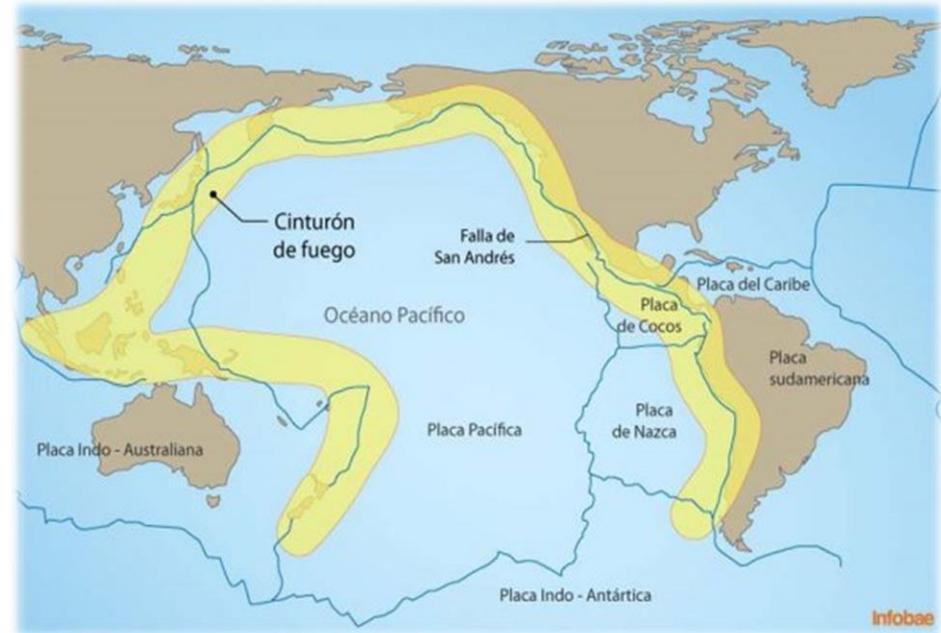
Naturaleza de los Volcanes

- Distribución de la actividad volcánica:

-Las erupciones volcánicas son maneras que posee la tierra para enfriarse y transmitir la energía y el calor interno a la superficie terrestre.

-La mayor actividad volcánica del mundo se ha registrado en el Cinturón de Fuego.

-Se debe al movimiento constante de las placas tectónicas.



Fuente: Infobae.

Fundamento Teórico

Índice de Explosividad Volcánica (VEI)						
VEI	Clasificación	Descripción	Altura Pluma	Volumen material volcánico	Frecuencia	Ejemplo
0	Hawaiano	No-Explosiva	<100 mts.	>1.000 m ³	Diariamente	1983 Kilauea, HAW
1	Hawaiano/ Estromboliano	Ligera	100-1000 mts.	>10.000 m ³	Diariamente	2002 Nyiarongongo, CON
2	Estramboliano/ Vulcaniano	Explosiva	1 – 5 Km	>1.000.000 m ³	Semanalmente	2015 Villarrica, CHI
3	Vulcaniano	Violenta	3 – 15 Km	>10.000.000 m ³	Anualmente	1985 Nev del Ruiz, COL
4	Vulcaniano/ Pliniano	Cataclísmica	10 – 25 Km	>100.000.000 m ³	Cada 10 años	1982 Galunggung, IND
5	Pliniano	Paroxística	>25 Km	>1 km ³	Cada 100 años	2015 Calbuco, CHI
6	Pliniano/ Ultra-Pliniano	Colosal	>25 Km	>10 km ³	Cada 100 años	1883 Krakatoa, IND
7	Ultra-Pliniano	Mega-Colosal	>25 Km	>100 km ³	Cada 1.000 años	1815 Mont Tambora, IND
8	Ultra-Pliniano	Apocalíptica	>25 Km	>1000 km ³	Cada 10.000 años	640.000 AP Yellowstone EEUU

Fuente: Elaboración propia

Fundamento Teórico

Naturaleza de los Volcanes

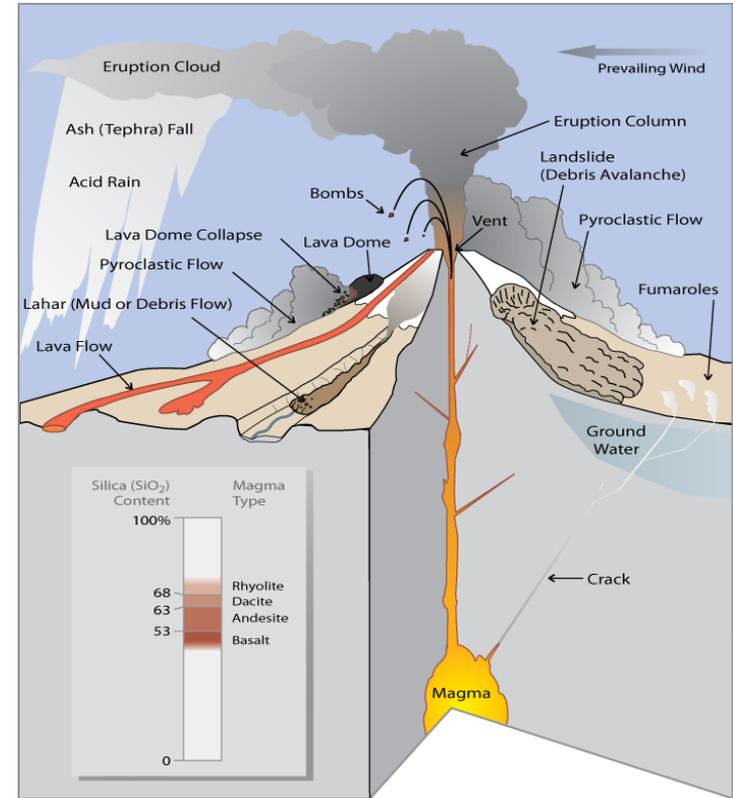
- Peligros asociados a una erupción:

Tefra: Todo fragmento de lava o roca volcánica de cualquier tamaño arrojado al aire por las explosiones de gases calientes de una erupción.

Flujos piroclásticos: Colapso gravitacional de cenizas, fragmentos de roca y gases volcánicos calientes que descienden por las laderas de un volcán en forma de avalanchas.

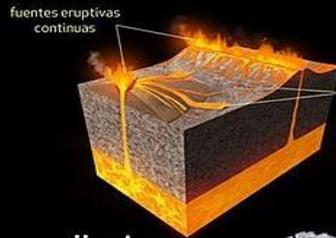
Lahares: Mezcla de materiales volcánicos sólidos, que mezclados con agua caen por efecto de la gravedad, descendiendo a gran velocidad por su naturaleza líquida.

Lava: Masas de roca fundida que se desparraman por la superficie terrestre.



Fuente: USGS

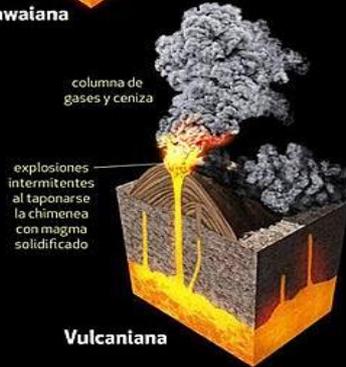
Tipos de erupciones volcánicas



Hawaiana



Estromboliana

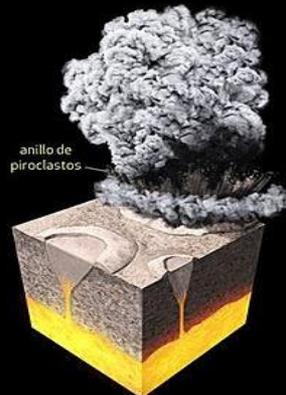


Vulcaniana

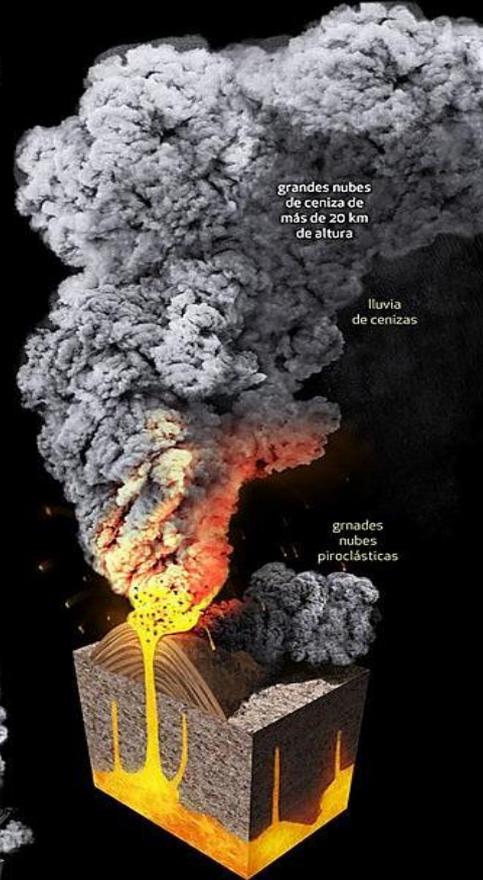
nubes piroclásticas



Domos de lava



Freato-magmática en mares



Pliniana

Los diferentes edificios volcánicos no están a escala

Fundamento Teórico

Naturaleza de los Volcanes

- Peligros asociados a la erupción de Calbuco en Abril 2015:
 - Columna eruptiva que alcanzó los 15 Km de altura y 240 millones de metros cúbicos.
 - Emisión de fragmentos de material incandescente.
 - Emisión de flujos de lava.
 - Dispersión de material piroclástico del tipo ceniza y pómez.
 - Hasta 1 metro de cenizas se detectó en Ensenada.
 - Lahares que viajaron hasta una distancia cercana a los 15 kilómetros.
 - Cambios morfológicos en las laderas del volcán.



Desarrollo Metodológico

1.- Descarga Par Interferométrico

The image displays the Sentinel Scientific Data Hub interface. On the left, the 'Advanced Search' panel is visible, showing search criteria for Mission: Sentinel-1, Product Type: SLC, and Sensor Mode: IW. The main map area shows a geographical view of Chile with an orange rectangular selection box over a coastal region. On the right, a search results panel is open, displaying 'Display 1 to 4 of 4 products.' and listing four SAR-C products with their respective download URLs and sensing dates.

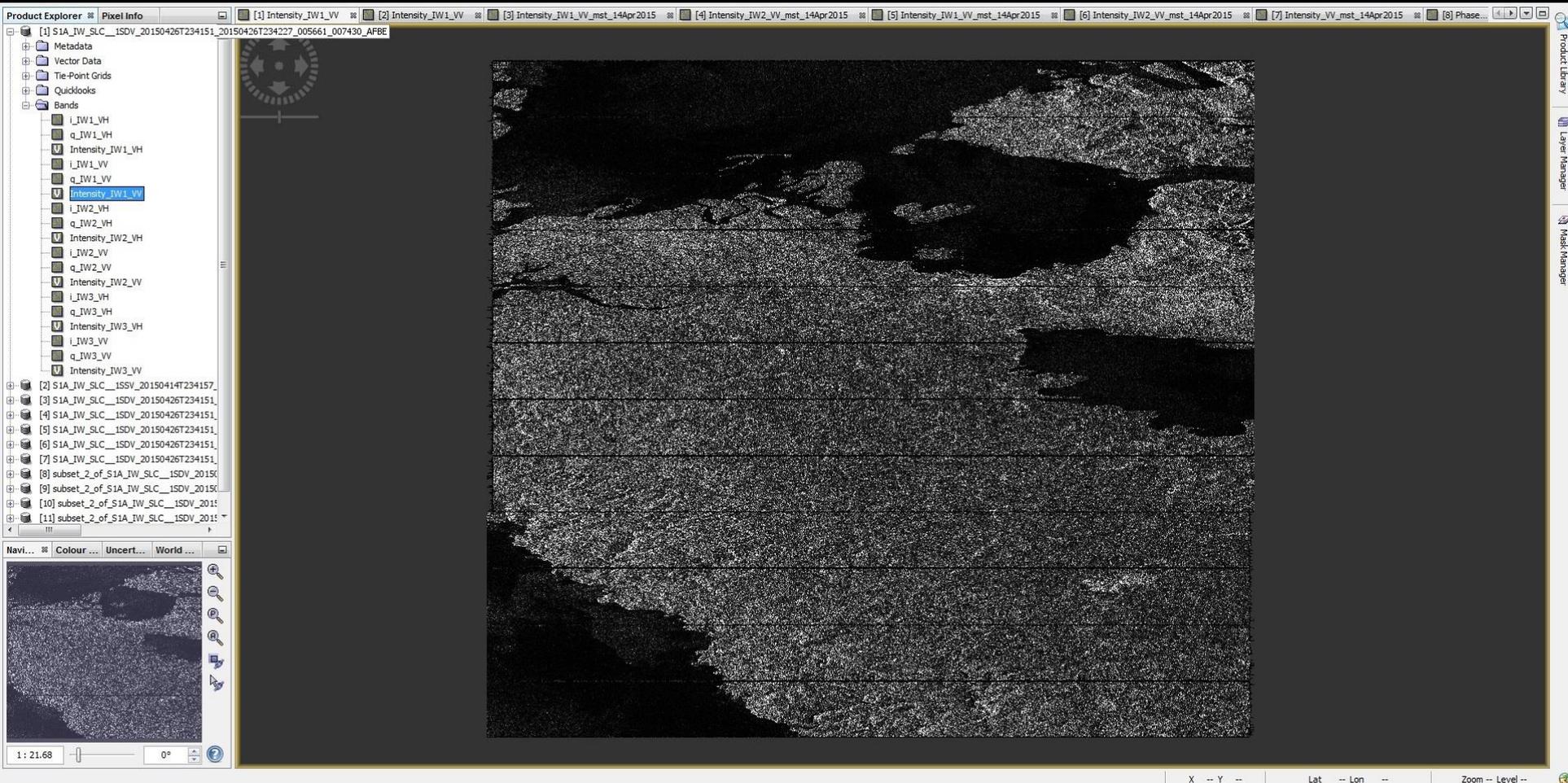
Advanced Search Criteria:

- Mission: Sentinel-1
- Product Type: SLC
- Sensor Mode: IW

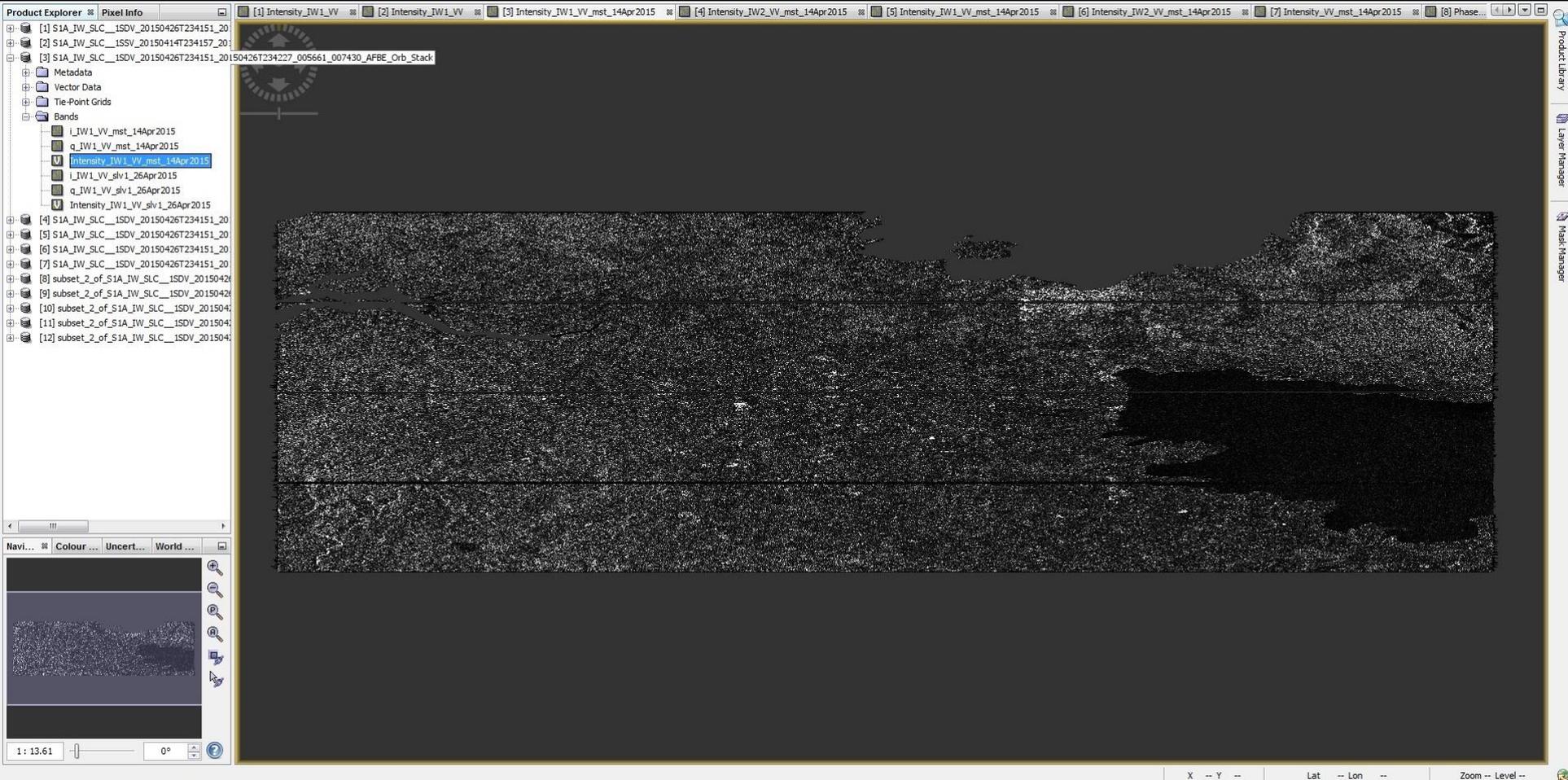
Search Results:

- S1A SAR-C S1A_IW_SLC_1SDV_20150426T234151_20150426T234227_005...**
Download URL: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('cf901fc'\)](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('cf901fc'))
Mission: Sentinel-1; Instrument: SAR-C; Sensing Date: 2015-04-26T23:41:51.
- S1A SAR-C S1A_IW_SLC_1SSV_20150421T095746_20150421T095813_005...**
Download URL: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('34d5'\)](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('34d5'))
Mission: Sentinel-1; Instrument: SAR-C; Sensing Date: 2015-04-21T09:57:46.
- S1A SAR-C S1A_IW_SLC_1SSV_20150414T234157_20150414T234224_005...**
Download URL: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('263c'\)](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('263c'))
Mission: Sentinel-1; Instrument: SAR-C; Sensing Date: 2015-04-14T23:41:57.
- S1A SAR-C S1A_IW_SLC_1SSV_20150414T234132_20150414T234159_005...**
Download URL: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('37cf'\)](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('37cf'))
Mission: Sentinel-1; Instrument: SAR-C; Sensing Date: 2015-04-14T23:41:32.

2.- Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) y apertura de imágenes SAR



3.- Corregistro



4.- Deburts

The screenshot displays a remote sensing software interface. On the left, the **Product Explorer** shows a tree view of data layers. The **Bands** folder is expanded, showing several layers, with **Intensity_IW1_VV_mst_14Apr2015** selected. Below the Product Explorer is a **Pixel Info** panel. The main window shows a grayscale satellite image of a forested area with a road and a water body. The interface includes a **Navi...** panel at the bottom left with a zoom slider set to 1:13.6 and a rotation control set to 0°. The bottom status bar shows coordinates for X, Y, Lat, Lon, and Zoom/Level.

Product Explorer

- [1] S1A_IW_SLC__ISDV_20150426T234151_20
- [2] S1A_IW_SLC__ISDV_20150414T234157_20
- [3] S1A_IW_SLC__ISDV_20150426T234151_20
- [4] S1A_IW_SLC__ISDV_20150426T234151_20
- [5] S1A_IW_SLC__ISDV_20150426T234151_20150426T234227_005661_007430_AFBE_Orb_Stack_deb

Bands

- i_IW1_VV_mst_14Apr2015
- q_IW1_VV_mst_14Apr2015
- Intensity_IW1_VV_mst_14Apr2015**
- i_IW1_VV_slv1_26Apr2015
- q_IW1_VV_slv1_26Apr2015
- Intensity_IW1_VV_slv1_26Apr2015

Pixel Info

Navi... **Colour...** **Uncert...** **World...**

1:13.6 0°

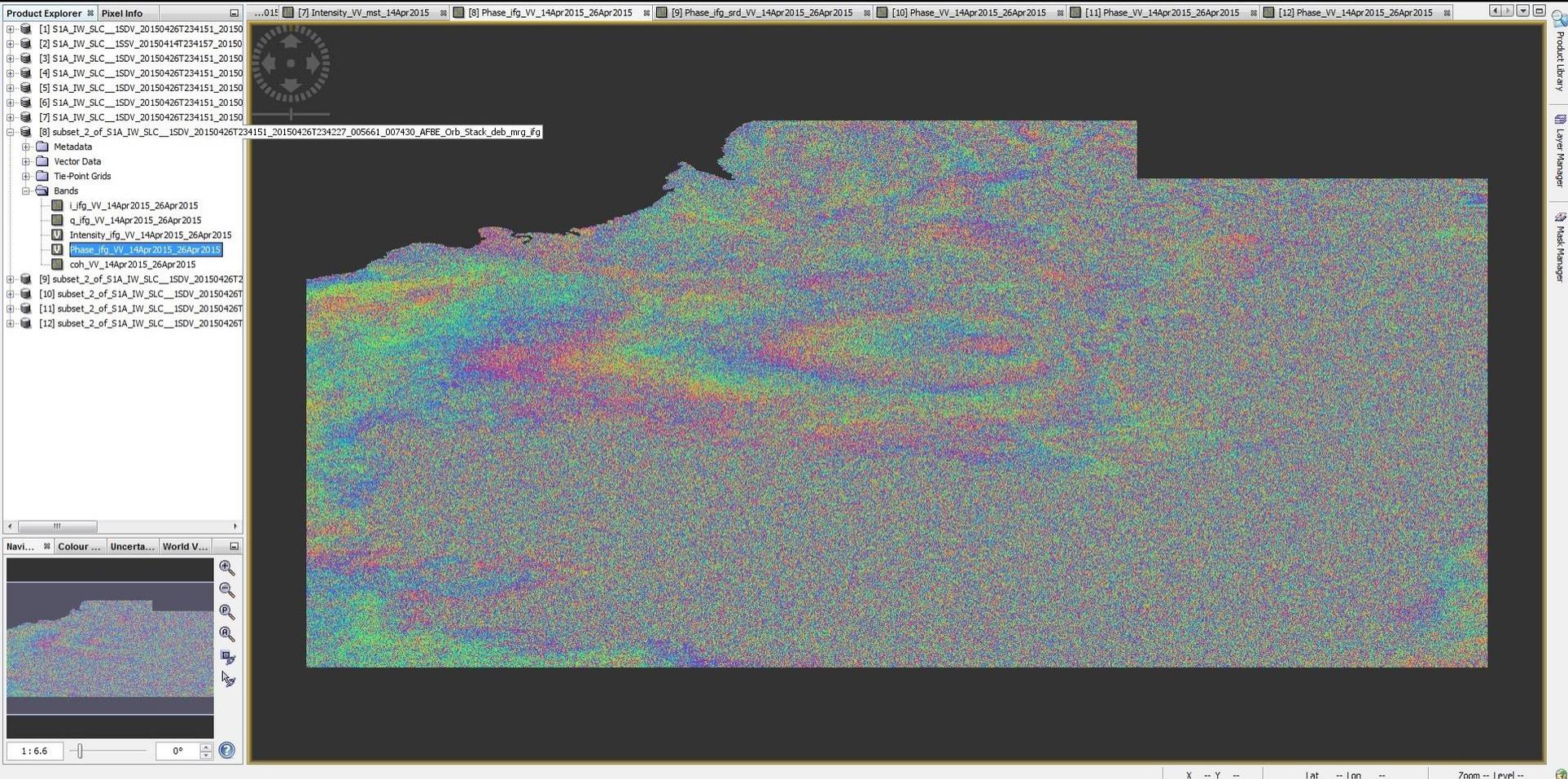
X -- Y -- Lat -- Lon -- Zoom -- Level --

5.- Merge

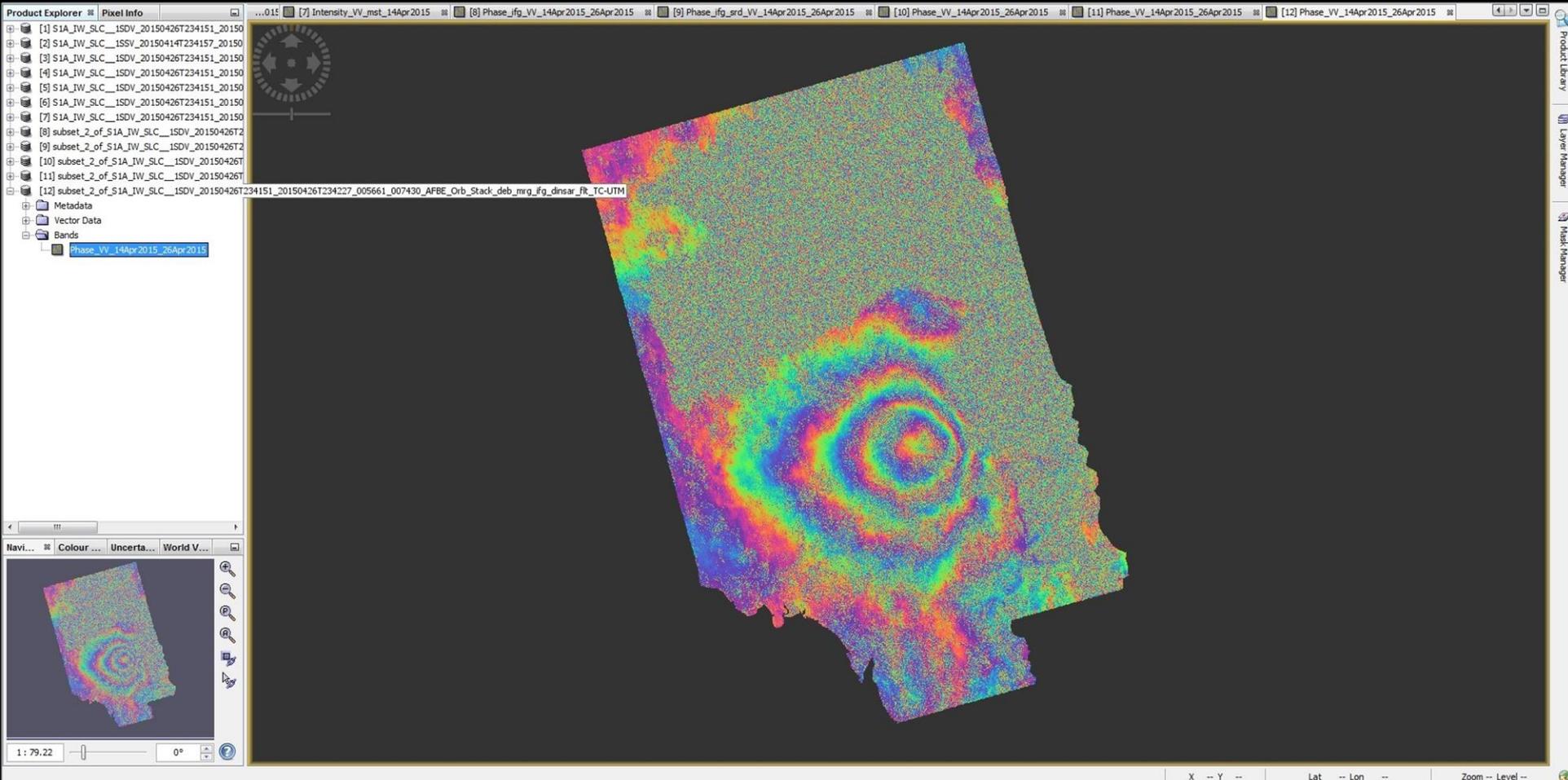
The screenshot displays a GIS application window with the following components:

- Product Explorer (Left Panel):** Lists various data layers. The 'Bands' folder is expanded, showing a list of layers including 'i_VV_mst_14Apr2015', 'q_VV_mst_14Apr2015', 'i_VV_slv1_26Apr2015', 'q_VV_slv1_26Apr2015', and 'Intensity_VV_mst_14Apr2015' (which is selected and highlighted in blue). Below this, there are 12 'subset_2_of_S1A_IW_SLC__1SDV_...' layers.
- Main Map Area:** Shows a grayscale satellite image of a coastal or urban area. A large, dark, irregularly shaped area is visible, likely representing a shadow or a masked region. The image is composed of multiple overlapping bands.
- Navigation Panel (Bottom Left):** Includes a 'Navi...' tab, a 'Colour...' tab, and an 'Uncert...' tab. It features a small thumbnail of the map and a scale indicator showing '1 : 10.47'.
- Top Panel:** Displays a list of active layers with checkboxes and names, such as '[1] S1A_IW_SLC__1SDV_20150426T234151_20', '[2] S1A_IW_SLC__1SSV_20150414T234157_20', and '[8] Phase...'. A 'Pixel Info' window is also visible in the top left corner of the map area.
- Right Panel:** Contains vertical toolbars for 'Product Library', 'Layer Manager', and 'Mask Manager'.

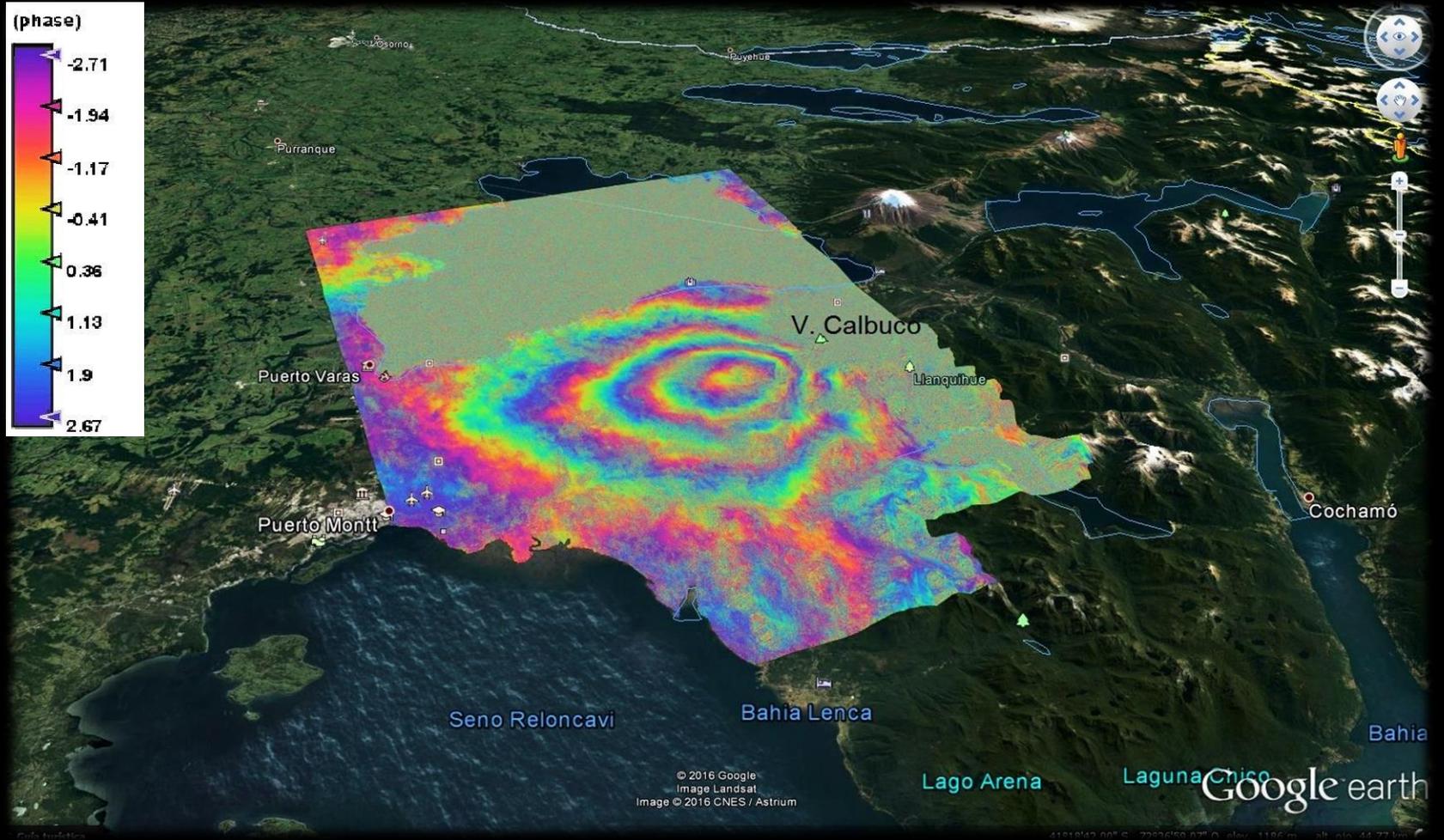
6.- Subset y Fase Interferométrica



9.- Terrain Correction (UTM, WGS84 Huso 19)



9.- Visualización en Google Earth (Lat/Long WGS84)



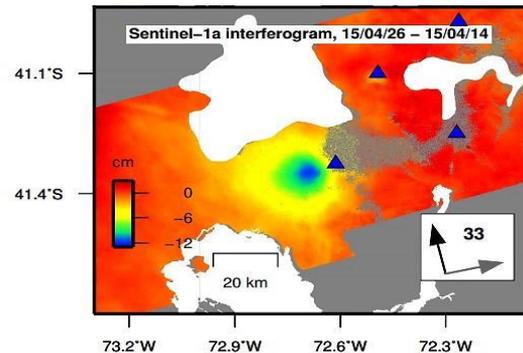
Resultados

En base a la regla interpretativa para Interferogramas ya descrito, se observa:

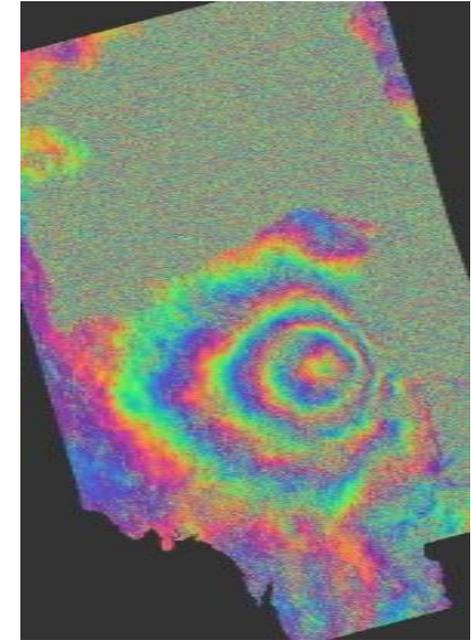
- Los colores observados describen un patrón Azul-Naranja-Amarillo hacia el interior de los anillos.
- Existe alargamiento de Fase (-2,71 → 2,67).
- Avistamiento de 4 anillos hacia el interior.

Para Sentinel-1^a, cuya longitud de onda es $\lambda \sim 5,6$:

- La erupción del Volcán Calbuco en Abril de 2015 provocó una subsidencia de ~ 12 cm en dirección Línea de Visada (Line of Sight) en el flanco Sur-Oeste del cono.
- Resultados corroborados por SERNAGEOMIN



Fuente: CEOS Pilot Project.



Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

Propuesta de Implementación

Integración de tecnología InSAR a las redes de monitoreo volcánico SERNAGEOMIN:





Conclusiones

- ✓ Tecnología Radar óptima para obtener datos terrenos en independencia de luz solar y condiciones meteorológicas.
- ✓ Tecnología SAR permite resoluciones útiles desde espacio en el marco del estudio de movimientos superficiales.
- ✓ Con InSAR es posible obtener DEM's en ausencia de movimiento superficial.
- ✓ Asertividad de técnica DInSAR. Permite obtener diferenciales de movimiento a nivel sub-métrico en superficies observadas, con asistencia de DEM externo.
- ✓ Eficiencia de Software S1TBX para fines interferométricos con Sentinel 1A.
- ✓ La erupción del Volcán Calbuco en Abril de 2015 provocó una subsidencia de ~12cm en dirección Línea de Visada (Line of Sight) en el flanco Sur-Oeste del cono.
- ✓ Datos corroborados por SERNAGEOMIN.
- ✓ Factibilidad de implementación Tecnología InSAR en redes de monitoreo volcánico de SERNAGEOMIN.



Conclusiones

- Tabla comparativa entre sistema InSAR, GPS e Inclínómetros:

	InSAR	GPS	Inclínómetros
a) Instalaciones en terreno	Innecesaria	Necesaria	Necesaria
b) Información en masa	Posible	Imposible	Incompleta
c) Observación continua	Imposible	Posible	Posible
d) Medición de deformación acumulada	Indirectamente	Observable	Observable
e) Detección del movimiento	1 Dimensión	3 Dimensión	1 Dimensión
f) Tiempo de observación	Cada 12/6 días	Continua	Continua

Fuente: Elaboración Propia.

Gracias por su atención