



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

ESTUDIO DE DEFORMACIÓN CORTICAL DEBIDO A
PROCESOS VOLCÁNICOS MEDIANTE EL USO DE
INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL SAR

Alumna: Micaela Castellani

Director: Dr. Sebastián Balbarani

Codirector: Dr. Mauricio Gende

Dra. Gabriela Badi
(Jurado)

Dr. Casas, J. Augusto
(Jurado)

Dr. Sebastián Balbarani
(Jurado)

LA PLATA, ARGENTINA

7 de octubre de 2024

Resumen

La teledetección es una de las herramientas más útiles a la hora de estudiar de forma remota fenómenos sobre grandes extensiones de terreno. En este campo, la Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR, por sus siglas en inglés) ha evolucionado a lo largo del tiempo de manera tal de poder llegar a proporcionar productos de desplazamiento de terreno con precisión milimétrica, siendo una de sus aplicaciones más importantes el estudio de la deformación cortical.

El objetivo de este trabajo fue adquirir conocimiento sobre la técnica DInSAR y aplicarlos para interpretar resultados interferométricos, haciendo foco en la deformación en una zona volcánica centrada en el volcán Sabancaya, en Perú, perteneciente al Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS). El mismo es un volcán activo y continuamente erupcionando desde noviembre de 2016, donde además la zona cuenta con múltiples sistemas de fallas alrededor del Complejo. La finalidad del trabajo fue mapear la deformación generada por la dinámica del volcán, así como también posibles interacciones con estos sistemas de fallas. Para realizar este estudio, se procesaron imágenes de la misión SAR Sentinel-1 y se tomaron intervalos temporales, desde 2014 hasta 2021, cubriendo el inicio de la erupción del 2016. Todas las imágenes utilizadas fueron descargadas de manera gratuita desde el repositorio provisto por la Agencia Espacial Europea (ESA) y procesadas con el software Sentinel Application Platform (SNAP), donde se estudió y parametrizó la cadena de procesamiento DInSAR. Adicionalmente, se analizó la decorrelación temporal en pares interferométricos de línea base temporal larga, así como también la descomposición del vector deformación en sus componentes Este-Oeste y Up-Down.

A partir de los resultados obtenidos, se construyeron mapas de coherencia, fase interferométrica y de deformación en la dirección de vista del radar, en pasadas ascendentes y descendentes, que permitieron encontrar un centro de deformación al norte del Complejo, así como también deformación de origen tectónica en el año 2021. Estos datos fueron luego validados con informes del Observatorio Volcánico y del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú.

La experiencia permite denotar la gran utilidad de la técnica DInSAR en estudios geofísicos debidos a que ayudan a comprender sistemas tan dinámicos y de gran extensión como lo puede ser un complejo volcánico, e incluso analizar su evolución temporal, la cual se puede utilizar como una herramienta complementaria con fines de prevención y alerta temprana.

Agradecimientos

A mis amigos, quienes me acompañaron desde antes de empezar este camino, y a quienes fui conociendo a lo largo del mismo. No hubiera sido posible sin las risas, mates y esfuerzo día a día para cumplir este sueño.

A mis directores, Sebastián y Mauricio, quienes fueron guías profesionales y personales a lo largo de todo el trabajo y demostraron una calida humana excelente.

A mi familia, quienes me apoyaron desde el momento cero para llegar a esta meta. En especial a mis hermanos, quienes me orientaron desde siempre para cumplir mis sueños y a quienes deseo siempre que se cumplan los suyos.

A la Universidad Nacional La Plata por permitirme estudiar una carrera tan hermosa, con educación pública, gratuita y de calidad que siempre se defiende.

A mi mamá por estar ahí siempre caminando conmigo, con ser un pilar de fortaleza y un ejemplo para toda la familia.

A mi papá por aconsejarme seguir mis sueños siempre, por la paciencia y los consejos. Aunque no estés acá físicamente, tu cariño y los recuerdos me acompañan para siempre.

Índice general

1. Introducción	11
2. Interferometría SAR	13
2.1. Breve reseña de teledetección	13
2.2. Radar de Apertura Sintética	14
2.2.1. La imagen SAR	19
2.3. Interferometría SAR	19
2.3.1. Decorrelación Interferométrica.	21
2.3.2. Ambigüedades en la conversión de fase a altura	22
2.3.3. Desenrollado de Fase	23
2.4. Interferometría Diferencial SAR	23
2.5. Aplicaciones y limitaciones	25
3. Área de estudio	27
3.1. Zona de estudio	27
3.1.1. Contexto Geológico.	27
3.2. Aplicaciones previas de DInSAR en el área de estudio.	30
4. Metodología	32
4.1. Selección de imágenes	32
4.2. Procesamiento	37
4.2.1. Flujo de Procesamiento.	37
4.2.2. Descomposición de la deformación.	45
5. Resultados	48
5.1. 2016	48
5.1.1. Pasada Ascendente	49
5.1.2. Pasada Descendente	51
5.2. Intervalo 2014 a 2017	54
5.2.1. Pasada Ascendente	55
5.2.2. Pasada Descendente	58
5.3. Comparación 2017	60
5.4. Falla 2021	61
5.4.1. Pasada Ascendente	63
5.4.2. Pasada Descendente	64
5.5. Productos de desplazamiento finales	64

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
5.5.1. 2016	64
5.5.2. 2014-2017	66
5.5.3. Interpretación de resultados	67
6. Conclusiones	68
6.1. Trabajos a futuro	69
7. Anexos	73
7.1. Plataforma Sentinel-1	73

Índice de figuras

2.1.	Ilustración de sensor pasivo. Fuente: ARSET	13
2.2.	Ilustración de sensor activo. Fuente: ARSET	14
2.3.	Órbita ascendente y descendente de SAR. Fuente: TRE Altamira	15
2.4.	Adquisición de una imagen de SAR: El satélite se mueve en una dirección de vuelo y emite ondas en una Dirección de Vista (LOS) que ilumina una zona en la superficie, o Footprint. La misma se expresa en Rango terrestre y azimuth. Por otro lado está el Rango oblicuo, que es la distancia entre el satélite y un punto de la superficie. El ángulo que se forma entre el Rango Oblicuo y la vertical se conoce como ángulo de incidencia. Elaboración propia basada en [Franceschetti and Lanari, 1999]	16
2.5.	Espectro electromagnético de las bandas utilizadas en SAR. Fuente: NASA Earth Data	17
2.6.	Polarización de las ondas emitidas y recibidas en SAR. Fuente: Curso teledección en ArcGIS.	18
2.7.	Efectos de la topografía y el ángulo de incidencia. En este caso α es el ángulo de incidencia, A es el acortamiento, B es la inversión y C es la sombra que se genera a partir de la topografía. Fuente: [Rosell, 2022]	18
2.8.	Esquema de adquisición de datos. A) Configuración Single-pass: los puntos P y P' no pueden resolver su ubicación debido a que son mapeados en una sola celda y el ángulo θ no puede ser medido. B) Configuración Across-Track o Interferométrica: dos sensores SAR montados en una plataforma, separados por una línea base B que se puede descomponer en línea base perpendicular y paralela. Fuente: Elaboración propia basada en [Hanssen, 2001].	20
2.9.	Diagrama esquemático de generación de un interferograma de fase enrollada, donde se ven las franjas de colores con ciclos de 2π . En la parte derecha de la imagen se puede ver que si se tiene una primer pasada, la fase va a tomar un valor determinado, pero si en la segunda pasada el terreno se deforma debido a una falla, el valor de la fase va a ser distinto. Ese cambio es el que ilustran las franjas interferométricas. Fuente: Geoscience Australia.	23

2.10. Ejemplo de Fase enrollada (Rojo) y desenrollada (Azul). Fuente: [Rosell, 2022]	24
3.1. Mapa de ubicación del volcán Sabancaya (Rojo), Hualca-Hualca (Azul) y Ampato (Verde). También se puede ver el Cañón del Colca (Naranja).	28
3.2. Esquema de un borde convergente de placa oceánica y continental. En el punto 2 se puede ver la fusión parcial de las rocas en profundidad y su ascenso a superficie. Fuente: modificado de [Stern, 2002]	29
3.3. Contexto estructural de la región Ampato-Sabancaya, donde se identifican los sistemas de fallas y lineamientos de la región, incluyendo el valle del río Colca. Fuente: modificado de [P et al., 2016]	30
3.4. Mapa del área de estudio (rectángulo rojo), los volcanes del CVAS y el Cañón del Colca (Naranja)	31
4.1. Modos de adquisición de Sentinel-1, de izquierda a derecha: Interferometric Wide Swath Mode, Wave Mode, Strip Map Mode y Extra Wide Swath. Fuente: European Space Agency	33
4.2. Diagrama de la geometría de adquisición TOPSAR, donde se puede ver cada pasada o Subswath. Fuente: [Calvet, 2022]	35
4.3. Ubicación esquemática de las imágenes procesadas, donde cada escena comprende el área de estudio. Se puede distinguir en Azul las imágenes descendentes y en Naranja, las imágenes ascendentes.	36
4.4. Diagrama de procesamiento interferométrico de imágenes Sentinel-1 tipo IW SLC. Fuente: elaboración propia basada de [Amin et al., 2021]	38
4.5. Ejemplo de una imagen SAR completa, con los 3 subswath y los 9 deburst correspondientes al modo IW. Fuente: SNAP tutorial.	41
4.6. Descomposición vectorial del desplazamiento en LOS para órbitas ascendente y descendente. Se pueden ver los vectores de desplazamiento en la dirección de LOS en la dirección ascendente y descendente. Luego, estos vectores se descomponen en la componente vertical y este-oeste. Fuente: modificado de [Bischoff et al., 2020]	46
5.1. Mapa de coherencia interferométrica en pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016	49
5.2. Mapa de fase enrollada en radianes de pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016	50
5.3. Mapa de fase desenrollada de pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016	50
5.4. Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del radar en pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016	51
5.5. Mapa de coherencia interferométrica en pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016	52

5.6. Mapa de fase enrollada en radianes de pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016	52
5.7. Mapa de fase desenrollada de pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016	53
5.8. Mapa de desplazamiento en la dirección de vista del Radar en pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016 .	54
5.9. Mapa de coherencia interferométrica en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017	55
5.10. Mapa de fase enrollada en radianes en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017	56
5.11. Mapa de fase desenrollada en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017	57
5.12. Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del Radar en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017	57
5.13. Mapa de coherencia interferométrica en pasada descendente para las fechas:12/11/2014 a 15/09/2017	58
5.14. Mapa de fase enrollada en radianes en pasada descendente para las fechas:12/11/2014 a 15/09/2017	59
5.15. Imagen extraída de la Figura 5.14 donde el rectángulo rojo indica un posible rumbo de las franjas interferométricas al norte del volcán Huelca-Hualca	59
5.16. Mapa de fase desenrollada en pasada descendente para las fechas:12/11/2014 a 15/09/2017	60
5.17. Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del Radar en pasada descendente	61
5.18. Productos del procesamiento del año 2017. Arriba-Izquierda: Mapa de coherencia interferométrica. Arriba-Derecha: Interferograma de fase enrollada en radianes. Abajo-Izquierda: Interferograma de fase desenrollada. Abajo-Derecha: Desplazamiento en la dirección de LOS.	62
5.19. Productos del procesamiento del año 2021 Ascendente para las fechas 19/09/2021 al 13/10/2021. Arriba-Izquierda: Mapa de coherencia interferométrica. Arriba-Derecha: Interferograma de fase enrollada en radianes. Abajo-Izquierda: Interferograma de fase desenrollada. Abajo-Derecha: Desplazamiento en la dirección de LOS.	63
5.20. Productos del procesamiento del año 2021 Descendente para las fechas: 18/09/2021 a 12/10/2021. Arriba-Izquierda: Mapa de coherencia interferométrica. Arriba-Derecha: Interferograma de fase enrollada en radianes. Abajo-Izquierda: Interferograma de fase desenrollada. Abajo-Derecha: Desplazamiento en la dirección de LOS.	64
5.21. Descomposición del desplazamiento en Up-Down (Izquierda) y E-W (Derecha) para el año 2016.	65
5.22. Descomposición del desplazamiento en Up-Down (Izquierda) y E-W (Derecha) para el intervalo 2014 a 2017.	65

7.1. Información de la plataforma Sentinel-1 73

Índice de tablas

2.1. Longitudes de onda y frecuencias centrales de las bandas utilizadas en la técnica SAR	17
4.1. Características de Sentinel-1. Fuente: Overview of Sentinel-1 Mission - ESA	34
4.2. Tabla de Imágenes seleccionadas. La referencia es aquella utilizada luego en el procesamiento para identificar a las imágenes, la Ruta indica un número de identificación de la órbita en sentido N-S, mientras que el Marco también es una porción geográfica de la imagen capturada que posee un número identificatorio único. Ambos números sirven para identificar una imagen de Sentinel-1.	37
4.3. Split aplicado a las imágenes seleccionadas.	39
4.4. Factores de Multilook aplicados a cada par interferométrico con Rango y Azimut.	42
5.1. Pares de imágenes seleccionadas en el año 2016 para el análisis junto con su respectiva línea base temporal y espacial.	48
5.2. Pares de imágenes seleccionadas en los años 2014 a 2017 para el análisis junto con su respectiva línea base temporal y espacial.	54
5.3. Pares de imágenes seleccionadas en 2017 en pasada descendente para ilustrar la mejora en los productos interferométricos con una disminución significativa de la línea base temporal B_T	61
5.4. Pares de imágenes seleccionadas en 2021.	62

Capítulo 1

Introducción

El análisis de la deformación en la superficie terrestre es esencial para comprender procesos geodinámicos y poder alertar sobre eventos geológicos potencialmente catastróficos. En el caso de los sistemas volcánicos, el estudio de sus cambios es muy importante para lograr generar alertas eruptivas, así como también poder comprenderlos y llegar a modelarlos.

El monitoreo y estudio volcánico es una rama multidisciplinaria y entre sus diversas técnicas se encuentra la Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR, por sus siglas en inglés), que se destaca por su capacidad para detectar desplazamientos en grandes extensiones de terreno con alta precisión y resolución espacial. DInSAR es una técnica de teledetección que utiliza imágenes de radar capturadas por instrumentos montados en satélites, para medir cambios milimétricos en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, incluso en áreas de difícil acceso y en cualquier condición climática [Hermosilla, 2016].

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar capacidades en el procesamiento de productos de Interferometría Diferencial SAR, aplicando dichos conocimientos sobre el volcán Sabancaya, activo y continuamente erupcionando desde noviembre de 2016, ubicado en el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS), en Perú. Este análisis se realizó bajo la hipótesis de que la técnica DInSAR puede ayudar a estudiar la deformación cortical generada por el sistema volcánico, así como también su interacción con posibles fallas cercanas al Complejo.

Para analizar la deformación de la corteza, se procesaron imágenes de la misión SAR Sentinel-1 provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA)¹, tomando intervalos temporales desde 2014 hasta 2021, en pasadas ascendentes y descendentes. Luego se procesaron las imágenes en el software SNAP (Sentinel Application Platform)², un software de herramientas de procesamiento y análisis de imágenes de la misión Sentinel.

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera: en el segundo Capítulo se explica conceptualmente la técnica DInSAR, pasando por principios de teledetección hasta llegar al producto interferométrico. Por otro lado, en el

¹<https://www.esa.int/>

²<https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>

tercer Capítulo se presenta la zona de estudio, las características geológicas del volcán así como también trabajos que se han realizado utilizando la técnica DInSAR en el mismo. El cuarto Capítulo explica paso a paso la cadena de procesamiento para la obtención de los productos, para luego en el quinto Capítulo mostrar los resultados del procesamiento para el año 2016, un intervalo del año 2014-2017, una comparación dentro del año 2017 y para el año 2021, junto con su interpretación. Dicha interpretación fue luego validada con informes técnicos provistos por el OVI (Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico) y el IGP (Instituto Geofísico del Perú).

Capítulo 2

Interferometría SAR

2.1. Breve reseña de teledetección

La teledetección es un modo de obtener información sobre un objeto o fenómeno de interés a distancia. En el caso que el objeto de estudio sea la Tierra, la técnica permite obtener información tanto sobre objetos terrestres, como sobre la superficie, mediante la utilización de sensores que pueden estar montados en aviones o en satélites.

El principio de funcionamiento de la teledetección se basa en la medición de la radiación electromagnética que recibe el sensor proveniente de la región de interés [Richards, 2009]. La radiación viaja en forma de ondas que en su propagación van a interactuar con los distintos materiales de la Tierra, proporcionando valiosa información sobre las características de la superficie observada, tales como la temperatura de la superficie, humedad del suelo, entre otras. El origen de la energía que luego se va a medir, permite realizar una primera distinción entre los tipos de sensores. Ellos pueden ser:

- *Sensores pasivos* : son aquellos que generan una imagen a partir de detección de energía electromagnética emanada por la superficie terrestre. La principal desventaja de este tipo de sensores es que son dependientes de la cobertura de nubes y la iluminación solar (Figura 2.1). Algunos ejemplos de sensores de este tipo son los utilizados en las misiones Landsat, GRACE o Sentinel-3.

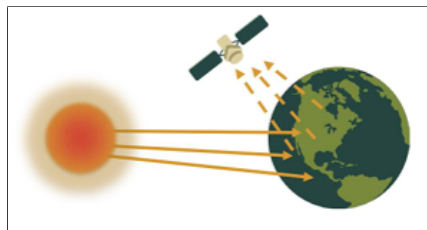


Figura 2.1: Ilustración de sensor pasivo. Fuente: ARSET

- *Sensores activos* : son aquellos que emiten pulsos electromagnéticos que iluminan el área de interés. Luego, el eco que retorna al sensor va a ser el resultado de la interacción del pulso emitido con los objetos terrestres (Figura 2.2). Algunos ejemplos de este tipo de sensores son el SAR de SAOCOM-1 o C-SAR de Sentinel-1.

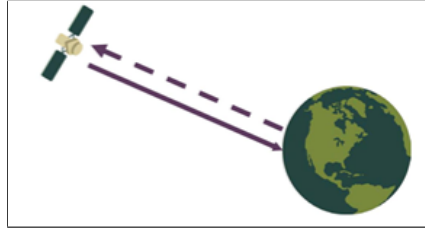


Figura 2.2: Ilustración de sensor activo. Fuente: ARSET

2.2. Radar de Apertura Sintética

Dentro de los sensores activos podemos encontrar los radares, que provienen del acrónimo en inglés “Radar” (RADIO Detection And Ranging). El funcionamiento de los mismos consiste en una antena que emite pulsos electromagnéticos en el rango de las ondas de radio y microondas. Luego, esos pulsos atraviesan el medio e interactúan con los objetos a su paso, resultando en una parte de la energía que se dispersa y otra parte se refleja y retorna al receptor ubicado en la misma antena de emisión [Hanssen, 2001]. Así, midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de estos pulsos, así como su frecuencia, amplitud y fase, se puede determinar distancia, velocidad y en algunos casos, la dirección del objeto detectado [Skolnik, 2001]. Existen distintos tipos de radar, que se distinguen por la forma de la señal emitida, ya sea un pulso de onda en la que se mide la diferencia de tiempo para calcular la distancia, o de onda continua, en el cual se mide el cambio en la frecuencia. También existe una diferenciación si se utiliza el movimiento relativo entre el radar y el objeto, armando una “antena virtual”. Este último tipo de radar se conoce como Radar de Apertura Sintética, o SAR por sus siglas en inglés.

El Radar de Apertura Sintética (SAR de aquí en adelante) aprovecha el movimiento relativo entre el sensor y la superficie de la Tierra para simular una antena mucho más grande, lo que permite la generación de imágenes mucho más detalladas [Curlander and McDonough, 1991].

Los satélites SAR se distinguen por dos direcciones de vuelo u órbitas. Las mismas se definen como la dirección en la que se desplaza la plataforma portadora del radar con respecto a la superficie terrestre. Pueden ser ascendentes (en sentido Sur - Norte) o descendentes (en sentido Norte - Sur), circunscriptas en órbitas polares con vistas laterales a derecha y/o izquierda. [Rosell, 2022] (ver Figura 2.3)

La técnica consiste en emitir pulsos que llegan a la superficie e iluminan un área conocida como *Footprint* con un ángulo de incidencia θ . Es importante

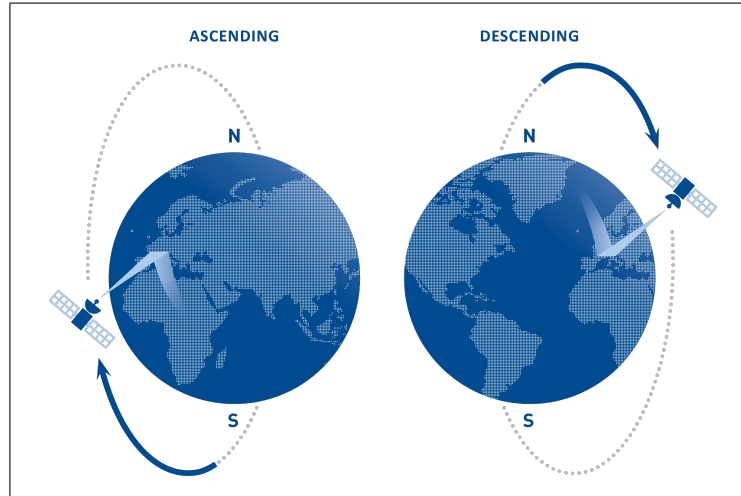


Figura 2.3: Órbita ascendente y descendente de SAR. Fuente: TRE Altamira

mencionar que el haz electromagnético va a incidir de manera lateral a la dirección de vuelo, en especial, debido a su construcción, SAR va a emitir ondas electromagnéticas hacia la derecha de la dirección de vuelo [Hanssen, 2001]. Esta dirección es conocida como *Line of Sight* o LOS, por sus siglas en inglés. Luego, la resolución del área iluminada va a estar dada por el *Rango terrestre* y el *Azimut* (ver Figura 2.4). El rango oblicuo, por otra parte es la distancia recorrida entre el satélite y el suelo, perpendicular a la dirección de vuelo [Franceschetti and Lanari, 1999]. La resolución en rango terrestre Δr se puede expresar como:

$$\Delta r = \frac{c * t}{2} \quad (2.1)$$

donde c es la velocidad de la luz y t la duración del pulso. Al mismo tiempo, $1/t$ es el ancho de banda del pulso Δf , por lo tanto, la fórmula anterior puede reescribirse como:

$$\Delta r = \frac{c}{2 * \Delta f} \quad (2.2)$$

Este resultado implica que la resolución va a depender inversamente de la frecuencia, es decir, que para obtener cada vez mayor resolución, será necesario emitir pulsos con mayor ancho de banda o, lo que es lo mismo, temporalmente muy cortos. Esta dependencia de la resolución con la frecuencia es un factor muy importante a la hora de decidir qué tipo de banda en frecuencia será útil para trabajar en distintos casos. Recordando que el radar trabaja en el rango de las microondas y las ondas de radio, el espectro de esta técnica está contenido entre los 0.3 a 12 GHz de frecuencia (ver Figura 2.5). Es importante destacar que la longitud de onda define la interacción de la señal con la superficie. En función de su longitud de onda, se dice que un satélite trabaja en una determinada banda, que estará estrechamente vinculada con la resolución espacial y la penetración del frente de ondas [Gómez Martín, 2021] (ver Tabla 2.1).

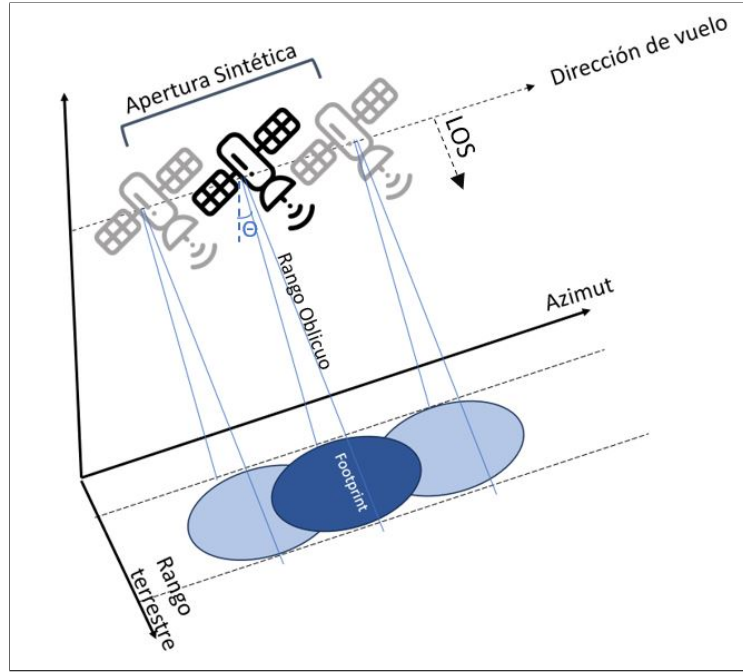


Figura 2.4: Adquisición de una imagen de SAR: El satélite se mueve en una dirección de vuelo y emite ondas en una Dirección de Vista (LOS) que ilumina una zona en la superficie, o Footprint. La misma se expresa en Rango terrestre y azimuth. Por otro lado está el Rango oblicuo, que es la distancia entre el satélite y un punto de la superficie. El ángulo que se forma entre el Rango Oblicuo y la vertical se conoce como ángulo de incidencia. Elaboración propia basada en [Franceschetti and Lanari, 1999]

Por otro lado, el azimuth se define como la dirección paralela a la dirección de vuelo (ver Figura 2.4). La resolución en la dirección del azimuth en este caso, va a estar dado por la siguiente ecuación:

$$r_{az} = \frac{\delta * R}{L} \quad (2.3)$$

en donde δ = longitud de onda, R es la distancia entre la antena y el objeto y L es la longitud de la antena. Por lo tanto, la resolución en azimuth mejora al disminuir la longitud de onda y/o aumentar la longitud de la antena, pero eso conduciría a construir antenas muy grandes. Una solución para esto es simular una antena de mayor tamaño mediante el movimiento a lo largo de una trayectoria [Rosell, 2022].

Además de la relación existente entre la longitud de onda y la resolución del área iluminada, es importante destacar que también se observa una influencia significativa de la polarización y el ángulo de incidencia en la generación de imágenes SAR. La polarización se define como la orientación específica del campo electromagnético de la onda transmitida o recibida por el radar. En la técnica SAR, las ondas se pueden polarizar de distintas maneras: Horizontal (H), Vertical(V). Entonces según como se emita o reciba la señal, las distintas

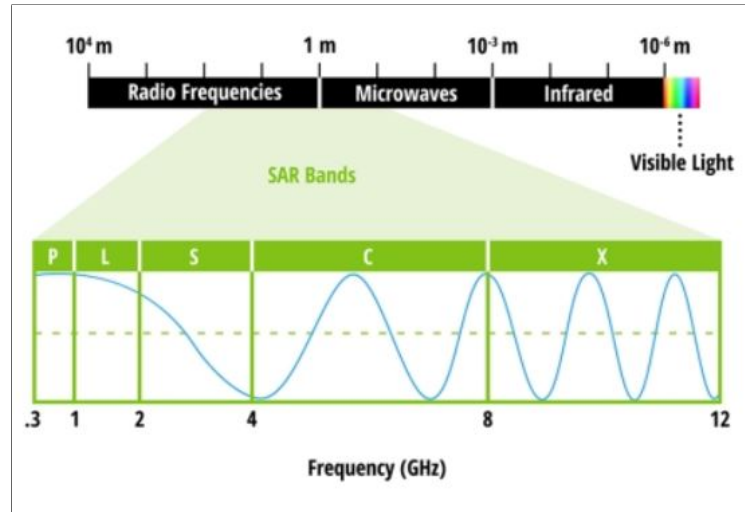


Figura 2.5: Espectro electromagnético de las bandas utilizadas en SAR. Fuente: NASA Earth Data

Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (GHz)
X	2.4 a 4	12 a 7.5
C	4 a 8	7.5 a 3.75
S	8 a 15	3.75 a 2
L	15 a 30	2 a 1
P	60 a 120	0.5 a 0.25

Tabla 2.1: Longitudes de onda y frecuencias centrales de las bandas utilizadas en la técnica SAR

polarizaciones pueden ser: HH, VV, HV y VH, donde la primer letra corresponde a la polarización emitida y la segunda, a la recibida. (ver Figura 2.6).

Por otro lado, el ángulo de incidencia se define como el ángulo entre la dirección de iluminación y la vertical de la superficie del terreno. Este ángulo irá cambiando según la altura del sensor sobre el horizonte del lugar. Es por eso que es importante tenerlo en cuenta, ya que va a afectar la retrodispersión de la señal y la calidad de la imagen obtenida [Oliver et al., 2003]. Los efectos de origen geométrico que se pueden originar debido a la captura lateral, afectadas por la topografía del terreno y características del mismo son (ver Figura 2.7):

- A. *Acortamiento (Foreshortening)*: es la deformación que ocurre cuando la imagen presenta zonas del terreno comprimidas o estiradas en función de la toma de la imagen. Las laderas cuya pendiente se encuentra orientada en la dirección de vista del sensor se verán más cortas en la dirección del rango inclinado.
- B. *Inversión (Layover)*: ocurre cuando el ángulo de incidencia es muy bajo

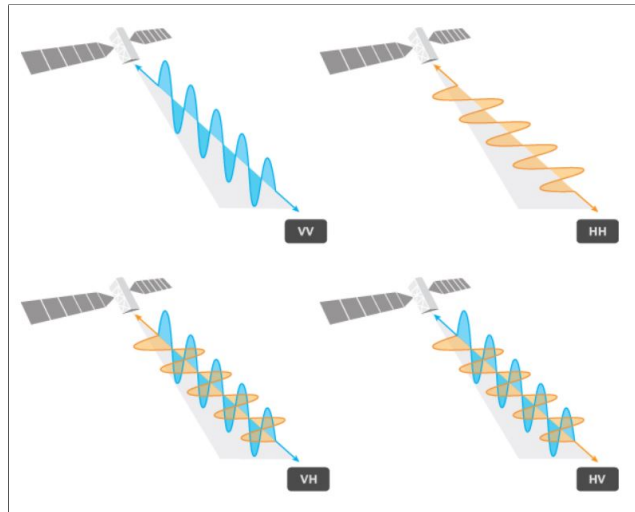


Figura 2.6: Polarización de las ondas emitidas y recibidas en SAR. Fuente: Curso teledetección en ArcGIS.

y la elevación del terreno es comparable o mayor que la distancia vertical entre el sensor y el punto de observación en la superficie terrestre. En este caso, partes de la superficie que están más allá de la cima de una pendiente o estructura elevada aparecen proyectadas en la imagen como si estuvieran en el lado opuesto de la estructura.

- C. *Sombra (Shadow)*: Suele suceder cuando la topografía es compleja y el radar no puede registrar detrás de laderas pronunciadas, dejando sin datos esa área.

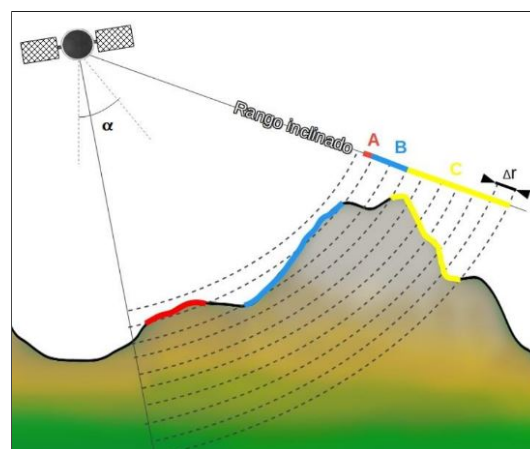


Figura 2.7: Efectos de la topografía y el ángulo de incidencia. En este caso α es el ángulo de incidencia, A es el acortamiento, B es la inversión y C es la sombra que se genera a partir de la topografía. Fuente: [Rosell, 2022]

2.2.1. La imagen SAR

Los datos que se adquieren en las antenas deben ser procesados para poder luego obtener un producto interpretable. Este procesamiento del dato SAR se realiza en dos pasos distinguibles, por un lado se tendrán las operaciones en rango y por otro lado, en azimut. El primer paso consta de mejorar la resolución en la dirección del rango, comprimiendo la onda modulada que recibió la antena [Hanssen, 2001]. Este procedimiento se hace filtrando la onda en el dominio de las frecuencias, donde cada línea de rango se multiplica por el complejo conjugado del espectro de la señal modulada transmitida, es decir, se realiza una correlación [Calvet, 2022]. Por otro lado, la operación para la dirección de azimut es análoga. La señal será convolucionada por el complejo conjugado de la respuesta esperada de un punto objetivo en la superficie, asociada a la señal transmitida. Por lo tanto, en rango y en frecuencia se aplica la misma operación de correlación.

El producto que se va a obtener de la técnica SAR es una imagen, que se puede definir como una grilla de píxeles, donde cada uno de ellos se asocia con una determinada área sobre la superficie terrestre. A su vez, cada píxel va a tener asociado consigo una amplitud y una fase, dando así información sobre el campo de ondas y la dispersión ocurrida, dentro de la resolución de cada píxel. En la construcción de la imagen, las columnas se van a asignar a la dirección de rango y las filas con la dirección de azimut [Hermosilla, 2016].

- *Amplitud*: Describe la magnitud de la señal reflejada. A mayor amplitud, más intensa es la señal recibida y por lo tanto, más brillante será la parte correspondiente en la imagen. Proporciona información sobre los elementos retrodispersores, así como la rugosidad y la estructura de la imagen observada.
- *Fase*: Representa la diferencia entre el sensor y la superficie, así como la geometría de la observación. Es información fundamental para la generación de imágenes interferométricas (InSAR), que explota este dato para medir, entre otras cosas, deformación en el terreno por ejemplo. La fase va a poder determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} * R + \Phi \quad (2.4)$$

Donde ϕ es la fase, λ es la longitud de onda de la señal, R es la distancia suelo-sensor y Φ representa las características dispersoras del píxel

2.3. Interferometría SAR

La interferometría de señales es el procedimiento por el cual se correlacionan señales de manera tal de poder obtener una propiedad significativa sobre las ondas originales. En el caso de que las ondas estén en fase, la interferencia será constructiva, pero si están en desfase, será destructiva. En casos intermedios,

se contará con una diferencia de fase que podrá ser utilizada como información [Calvet, 2022]. Como se mencionó en la sección anterior, al generar una imagen SAR se va a tener la información de fase en cada punto de la grilla. Por lo tanto, si se combinan dos imágenes corregistradas a nivel subpíxel, se puede encontrar una diferencia de fase que proporcione información valiosa.

Por otro lado, dentro de cada imagen SAR, cada píxel se va a encontrar a una distancia R al sensor. Sin embargo, esta distancia por sí sola no es suficiente para determinar la ubicación exacta del píxel en un plano de referencia, ya que los puntos se encontrarán siguiendo una curva de radio R (ver Figura 2.8 caso A). Para resolver esta ambigüedad, se emplean dos imágenes SAR capturadas desde posiciones ligeramente distintas, lo que se conoce como línea base (B) (ver Figura 2.8 caso B). La línea base puede lograrse de dos maneras: mediante el empleo de dos antenas montadas en el mismo satélite (técnica conocida como “*Single-pass Interferometry.*”), o bien, a través de dos pasadas del satélite por el área de interés en momentos temporalmente distintos (técnica conocida como: “*Repeat-pass Interferometry.*”) [Rosell, 2022]. En este último escenario, las dos pasadas del satélite están determinadas por el período de revisita de la misión. En el caso de esta tesis, se trabajará con el uso de interferometría de pasada repetida (ver Figura 2.8 caso B), específicamente con la misión Sentinel-1, cuyo período de revisita es de mínimo 6 días para el período de tiempo analizado (ver Anexo 1). Es importante tener en cuenta que la misión Sentinel-1B finalizó en el año 2022, si bien en este trabajo se utilizaron imágenes hasta el 2021.

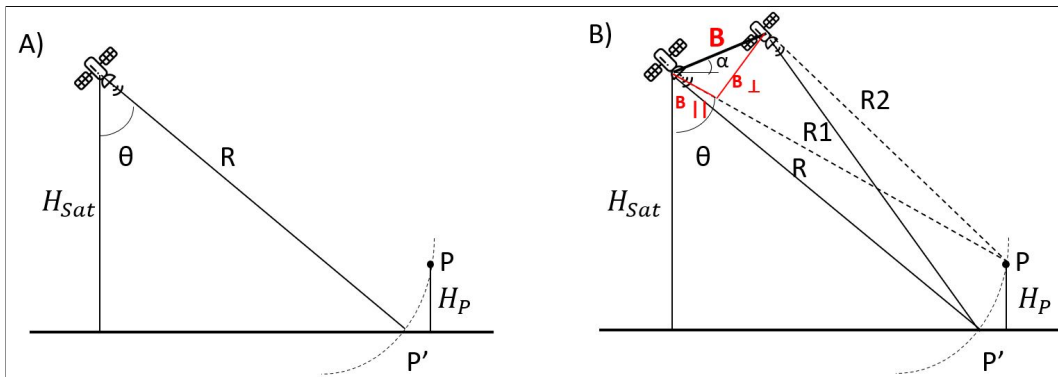


Figura 2.8: Esquema de adquisición de datos. **A)** Configuración Single-pass: los puntos P y P' no pueden resolver su ubicación debido a que son mapeados en una sola celda y el ángulo θ no puede ser medido. **B)** Configuración Across-Track o Interferométrica: dos sensores SAR montados en una plataforma, separados por una línea base B que se puede descomponer en línea base perpendicular y paralela. Fuente: Elaboración propia basada en [Hanssen, 2001].

La línea base puede ser principalmente de dos tipos [Hanssen, 2001]:

- *Temporal*: es la diferencia entre pasadas de la misión utilizadas para la generación de una imagen. También es conocida como resolución temporal (B_T).

- *Espacial*: puede descomponerse en línea base perpendicular (B_{\perp}) y línea base paralela (B_{\parallel}). En el caso de Interferometría tiene mayor relevancia B_{\perp} . (ver Figura 2.8)

Gracias a la adquisición del dato se genera el producto conocido como Imagen SAR, que se define como una representación 2D de la retrodispersión medida, que va a estar conformada por un conjunto de píxeles, y es el producto con el que se trabaja. En el caso de interferometría se cuenta con dos tipos de imágenes, una imagen *Master* o principal, que es por convención aquella que se obtuvo primero, y una imagen *Slave* o secundaria, que es aquella obtenida después, es decir, es la más reciente.

Entonces, el interferograma es formado por la multiplicación cruzada, píxel a píxel, de la imagen principal con el complejo conjugado de la imagen secundaria. Como cada píxel es un número complejo, la amplitud de las dos imágenes se va a multiplicar, mientras que las fases se van a sustraer [Hanssen, 2001].

Partiendo del supuesto de que un punto es observado por dos sensores desde distintos ángulos relativamente cercanos, la fase interferométrica de cada píxel de la imagen dependerá solo de las posiciones del recorrido de cada uno de los sensores (R1-R2), donde recordando la ecuación 2.4:

$$\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2) = -\frac{4\pi(R1 - R2)}{\lambda} + (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (2.5)$$

Para poder encontrar la relación sensor-suelo, la diferencia entre las fases vinculadas a los dispersores debería ser cero. Esto implica que entre las dos pasadas del sensor, las características del píxel deben permanecer sin cambios, cosa que difícilmente suceda. Esto permite caracterizar un parámetro denominado "Coherencia interferométrica" [Calvet, 2022].

Es importante destacar que se va a poder establecer una relación entre la diferencia de fase y la variación de la altura. Tal es así, que aplicando trigonometría y considerando que las dos antenas están muy lejos del objetivo en comparación a la línea base B, se puede obtener [Richards, 2009]:

$$\frac{d(\Delta\phi)}{d(H_P)} = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin(\theta)} \approx -\frac{4\pi B_{\perp} \cos(\theta)}{\lambda H_{Sat} \sin(\theta)} \quad (2.6)$$

2.3.1. Decorrelación Interferométrica.

La ecuación 2.6 indicaría que la sensibilidad del cambio de fase con la altura aumentaría a medida que aumenta B_{\perp} , sin embargo, existe un valor máximo a partir del cual la contribución de los ecos retrodispersados comenzarán a cambiar hasta el punto que los píxeles no tendrán coherencia entre sí [Calvet, 2022].

La decorrelación mide el grado de coherencia píxel a píxel, tomando valores en un intervalo de 0 a 1, siendo 1 la máxima correlación y 0, el hecho de que los píxeles no tienen coherencia entre sí.

El valor de la decorrelación va a dar una noción de ruido generado por diversas fuentes de error, entre los cuales se encuentran:

- *Geometría de adquisición*: se genera debido a cambios en las posiciones orbitales entre las fechas de adquisición. Este efecto es conocido como decorrelación espacial y se puede vincular matemáticamente con la línea base. Tal es así, que si la correlación toma el valor de 1, la línea base es 0 y por lo tanto las posiciones satelitales son las mismas. Por otro lado, si el valor es 0, entonces la decorrelación es total y podemos despejar y hallar el valor conocido como “Línea Base Crítica” que se define como [Rosell, 2022]:

$$B_{crit} = \frac{\lambda R}{2\Delta R \cos(\alpha - \epsilon)} \quad (2.7)$$

En donde ΔR es la resolución en rango, α es el ángulo de incidencia, ϵ es la pendiente del terreno en la dirección del rango, λ es la longitud de onda del sensor y R es la distancia sensor-superficie.

- *Decorrelación temporal*: se debe a cambios físicos y químicos en la cobertura del suelo por causa del paso del tiempo, agregando así ruido aleatorio al interferograma.
- *Corregistración*: es un error inducido en el procesamiento que impide la correspondencia píxel a píxel en la imagen.

2.3.2. Ambigüedades en la conversión de fase a altura

Como se mencionó anteriormente, al momento de realizar el interferograma, se realiza la multiplicación cruzada píxel a píxel entre la imagen principal y el conjugado de la imagen secundaria. Por lo que la amplitud se multiplica y las fases se restan. Esta operación matemática va a dar como resultado una imagen con franjas interferométricas que representan un cambio de fase con un ciclo de 2π . Estas franjas van a ser representadas como franjas de colores, donde cada ciclo representa una diferencia de rango relativo de media longitud de onda del sensor:

$$d_{LOS} = f \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.8)$$

Recordando que f es la cantidad de franjas interferométricas y λ es la longitud de onda del sensor, se va a obtener el desplazamiento en la dirección de vista del sensor (d_{LOS}). En el caso de Sentinel-1 el valor de λ es 5.2 cm.

Es por este motivo que contando las franjas y multiplicando por media longitud de onda se puede conocer la deformación del suelo. Mientras más cercanas estén las franjas, mayor es la deformación en esa zona. (ver Figura 2.9)

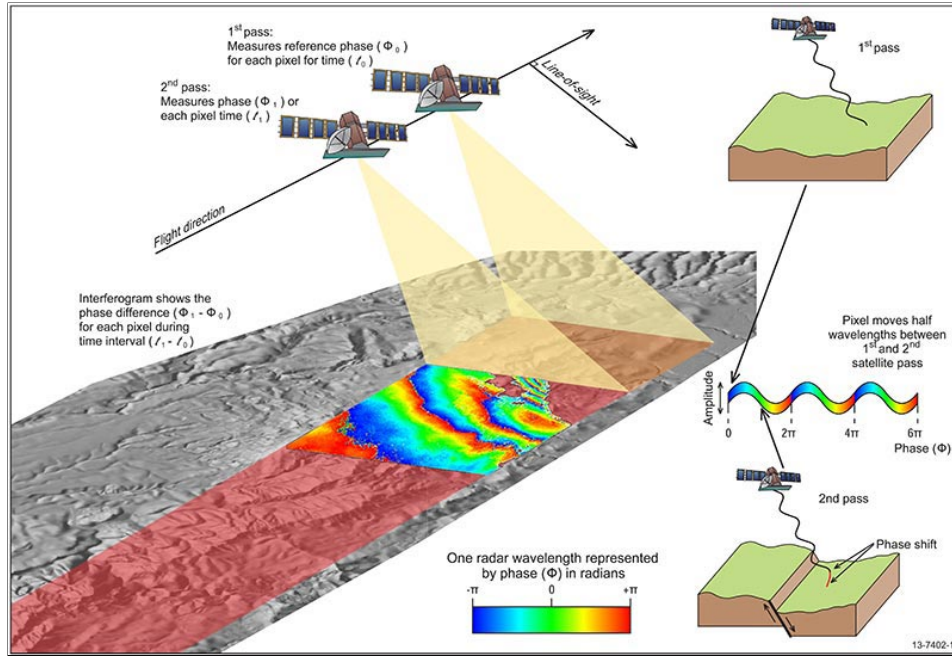


Figura 2.9: Diagrama esquemático de generación de un interferograma de fase enrollada, donde se ven las franjas de colores con ciclos de 2π . En la parte derecha de la imagen se puede ver que si se tiene una primer pasada, la fase va a tomar un valor determinado, pero si en la segunda pasada el terreno se deforma debido a una falla, el valor de la fase va a ser distinto. Ese cambio es el que ilustran las franjas interferométricas. Fuente: Geoscience Australia.

2.3.3. Desenrollado de Fase

El objetivo es extraer información importante sobre la deformación del terreno, siendo que la fase varía de manera cíclica, y para obtener información de deformación se requiere que la fase tome valores continuos. Para lograr eso, se aplica un proceso matemático que se denomina “Desenrollado de fase”.

Este procedimiento es necesario porque la fase interferométrica se mide solo en módulo 2π . Por ende, la fase medida puede contener saltos de fase, lo que hace que sea difícil interpretar correctamente información de topografía o deformación. El desenrollado va a ser entonces el proceso de identificar y corregir estos saltos de fase, tomando un píxel de referencia, para poder transformarlos a valores continuos (Ver Figura 2.10).

2.4. Interferometría Diferencial SAR

El desarrollo matemático de InSAR (Ec. 2.6) se basa en la hipótesis que el dispersor no cambia en el tiempo. Sin embargo, si se realiza la suposición de que éste realiza un pequeño desplazamiento, se puede llegar a obtener información de desplazamientos en la superficie del orden de la longitud de onda de la señal emitida por la antena. Además, esta técnica considera que la línea base perpendicular es idealmente cero, donde las imágenes se toman en distintos

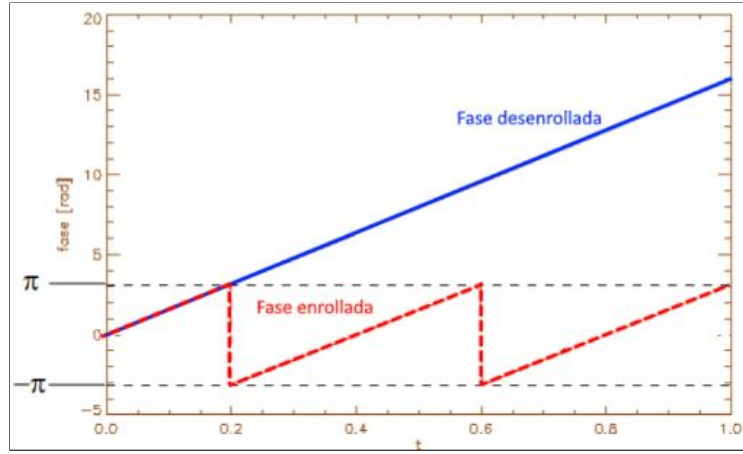


Figura 2.10: Ejemplo de Fase enrollada (Rojo) y desenrollada (Azul). Fuente: [Rosell, 2022]

tiempos. Recordando la ecuación 2.5, la relación $R1 - R2$ en este caso va a ser la magnitud del vector proyectado en la línea de vista del satélite (d_{LOS}). De esta manera, la ecuación de diferencia de fase (Ec. 2.5) va a quedar [Rosell, 2022]:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi(R_1 - R2)}{\lambda} = -\frac{4\pi}{\lambda}d_{LOS} \quad (2.9)$$

Sin embargo, es muy difícil que la línea base perpendicular sea nula, por lo que la ecuación, a partir de la Ecuación 2.6 quedará:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin(\theta)} \cdot H_P + \frac{4\pi}{\lambda}d_{LOS} \quad (2.10)$$

Este resultado es importante, debido a que si se cuenta con información externa sobre la topografía de la zona, como un Modelo Digital de Elevación (DEM), el primer término deja de ser una incógnita y el producto final tendrá solo información sobre la deformación que haya ocurrido a lo largo del LOS del satélite.

Desafortunadamente, la fase interferométrica es influenciada por otros factores distintos a la topografía y el desplazamiento. En un modo más general, la diferencia de fase entre dos imágenes va a estar dada por la composición de factores, de tal manera que se puede expresar según [Richards, 2009] como:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{pixel} + \Delta\phi_{noise} + \Delta\phi_{error} \quad (2.11)$$

En donde:

- $\Delta\phi_{topo}$ es la fase interferométrica asociada a la topografía. Coincide con el primer término de la ecuación 2.10.
- $\Delta\phi_{disp}$ es aquella causada por el desplazamiento.

- $\Delta\phi_{atm}$ es una diferencia de fase causada por variaciones en la atmósfera. Para compensar este efecto se pueden usar modelos y/o el uso de interferometría con varias líneas bases.
- $\Delta\phi_{pixel}$ resulta de cambios en la reflectividad del píxel observado.
- $\Delta\phi_{noise}$ resulta de ruidos de fase en el sistema de radar, y puede ser reducido realizando un promedio sobre un grupo de píxeles a costa de resolución espacial.
- $\Delta\phi_{error}$ proviene de la incertidumbre inherente de la ubicación de la plataforma y de la línea base.

2.5. Aplicaciones y limitaciones

Gracias a la alta precisión en la medición de desplazamientos y su aplicabilidad en áreas remotas, la utilidad de la técnica DInSAR en la geociencia es muy grande. Algunos ejemplos son:

- Medición de deformaciones en el terreno por movimientos tectónicos y sismos: se puede realizar mapeos de deformaciones superficiales causadas por terremotos y movimientos tectónicos, permitiendo una comprensión detallada de las fallas activas y la dinámica tectónica [Calvet, 2022] [Massonnet and Feigl, 1998].
- Subsistencia del suelo: la técnica se puede utilizar para monitorear hundimientos en áreas urbanas y rurales causadas por extracción de agua subterránea, minería, industria petrolera, entre otras actividades [Chaussard et al., 2014].
- Deslizamiento de tierra: se analiza detección y monitoreo de deslizamientos de tierra, proporcionando datos cruciales para mitigación de riesgos en áreas propensas a estos fenómenos [Rott et al., 2009].
- Monitoreo de glaciares: se puede estudiar la dinámica de glaciares, el flujo y variaciones en los mismos, contribuyendo al entendimiento del cambio climático [Joughin et al., 2010].
- Monitoreo de volcanes: DInSAR ayuda a detectar y monitorear la inflación y deflación de los volcanes, proporcionando información valiosa para alerta temprana de erupciones [Lu and Dzurisin, 2014].

Sin embargo, a pesar de sus numerosas ventajas, DInSAR presenta ciertas limitaciones que pueden afectar su precisión y aplicabilidad en diferentes contextos. Una de las principales dificultades es la decorrelación temporal, que ocurre cuando hay cambios físicos y químicos significativos en la superficie terrestre entre las imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos, lo que dificulta la comparación precisa, especialmente en áreas con cambios rápidos

y significativos en la vegetación. La decorrelación geométrica es otra limitación, resultante de diferencias en la geometría de visión entre dos adquisiciones de radar, lo que puede causar problemas de correlación de señales, especialmente en terrenos montañosos o con alta variabilidad topográfica. Además, las variaciones en la tropósfera y la ionósfera pueden introducir errores en las mediciones, afectando la precisión en la detección de desplazamientos, y estos efectos atmosféricos pueden ser difíciles de corregir [Hanssen, 2001].

Capítulo 3

Área de estudio

3.1. Zona de estudio

El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'33''$ S $71^{\circ}51'0''$ O) es un estratovolcán activo ubicado en el departamento de Arequipa, Perú. El mismo está situado en la Cordillera Occidental de los Andes, al sur del arco volcánico del Perú. La cumbre del volcán alcanza los 5980 m.s.n.m. y se encuentra a 70 km de la ciudad de Arequipa y 30 km al suroeste de la localidad de Chivay (ver Figura 3.1).

El Sabancaya se encuentra a 20 km del Cañón del Colca, formando parte del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS). Dentro del CVAS se encuentran otros dos volcanes: Ampato (al sur del Sabancaya) que se encuentra inactivo, y Hualca-Hualca (al norte del Sabancaya) que es un estratovolcán inactivo erosionado (ver Figura 3.1). La actividad del CVAS está monitoreada por el Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (OVI) y por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). El monitoreo del volcán se realiza por medio de siete estaciones sísmicas permanentes, dos estaciones GPS, una estación multigas y cuatro cámaras de vigilancia volcánica.

3.1.1. Contexto Geológico.

La litósfera terrestre se encuentra dividida en placas tectónicas que se “deslizan” sobre la astenósfera e interactúan entre sí, dando lugar a bordes, que pueden ser: divergentes (dos placas se separan entre sí), transformantes (dos placas se deslizan una respecto de la otra sin aparente acercamiento o alejamiento) o convergentes (una placa se mueve hacia la otra). Este último borde va a distinguirse según el tipo de placa que interactúen. En el caso que la convergencia se desarrolle entre dos placas de litósfera continental, al poseer densidad muy similar, van a acrecionar y generar cadenas montañosas de gran altura, como es el caso del Himalaya. Por otro lado, si una de las placas es de composición continental y otra es oceánica, esta última subductará por debajo de la primera, debido a que posee mayor densidad. En el proceso de subducción, la placa oceánica que se hunde arrastra con ella sedimentos del fondo oceánico y agua contenida en la roca. A medida que la placa subduce,

la temperatura aumenta y se deshidrata, liberando volátiles, lo cual baja el punto de fusión de los materiales en la cuña astenosférica presente entre las dos placas. Luego, por diferencia de presión, el material fundido va a tender a ascender, evolucionar y a su vez puede causar fusión de otros materiales, hasta que en algún punto puede llegar a superficie y permitiendo el desarrollo de arcos volcánicos [Stern, 2002] (ver Figura 3.2). Este origen es el responsable de la generación del cordón volcánico en donde se encuentra el CVAS, así como también el de la mayoría de los volcanes de Perú y de la Cordillera de los Andes, donde se produce a partir de la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana.

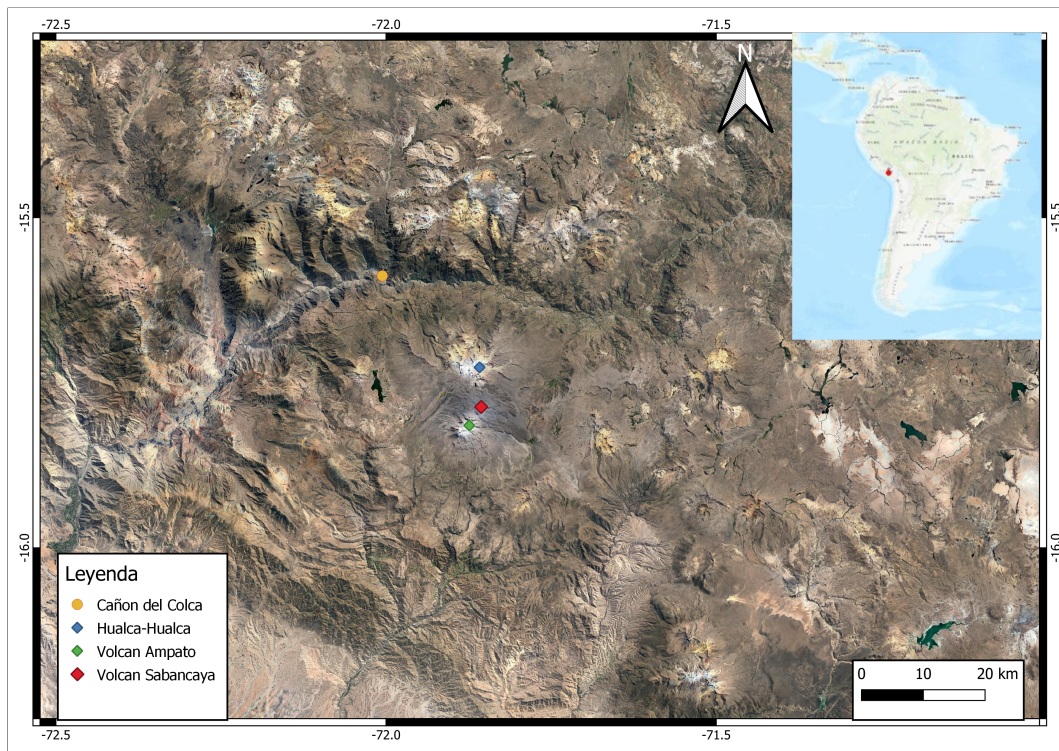


Figura 3.1: Mapa de ubicación del volcán Sabancaya (Rojo), Hualca-Hualca (Azul) y Ampato (Verde). También se puede ver el Cañón del Colca (Naranja).

El CVAS es geológicamente joven, donde se edificó primero el volcán Hualca Hualca en el Plioceno. Luego, se formó el volcán Ampato en el extremo sur a principios del Pleistoceno y finalmente, se edificó el volcán Sabancaya [P et al., 2016].

El volcán Sabancaya se formó en tres etapas sucesivas, compuestas por flujos de lava de composición andesítica y dacítica, intercaladas por depósitos de cenizas. El mismo ha experimentado varios estilos eruptivos, desde erupciones efusivas hasta explosivas, con episodios que han incluido emisiones de ceniza, flujos piroclásticos y emisión de lava [P et al., 2016].

El evento más reciente tuvo inicio el 6 de noviembre del 2016, cuando se registró a las 15:04 GMT una explosión que desencadenó un evento eruptivo de tipo vulcaniano que continúa hasta la actualidad, aunque se registró actividad

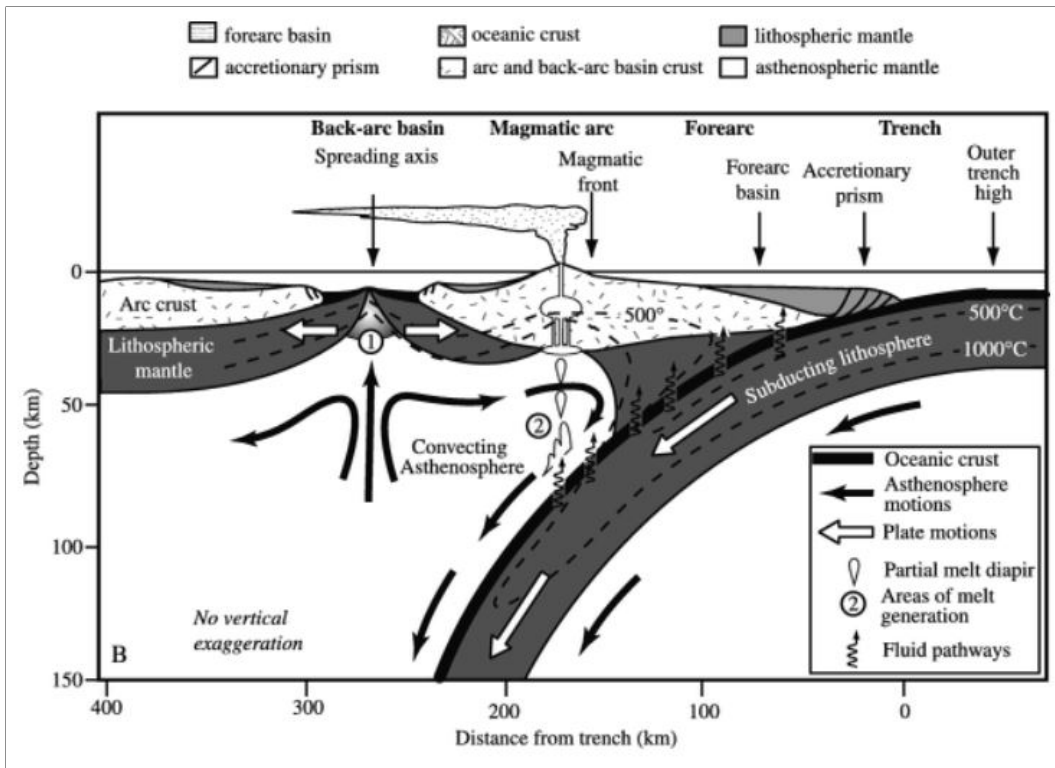


Figura 3.2: Esquema de un borde convergente de placa oceánica y continental. En el punto 2 se puede ver la fusión parcial de las rocas en profundidad y su ascenso a superficie. Fuente: modificado de [Stern, 2002]

sísmica asociada con el movimiento de fluido magmático desde principios del 2014 [del Perú, 2023]. El presente ciclo eruptivo está caracterizado por explosiones de tipo vulcanianas y freáticas, asociadas con emisión constante de SO_2 y emisiones de ceniza, crecimiento acelerado de un domo de lava y anomalías termales [Boixart et al., 2020].

Es importante mencionar que se distinguen varios sistemas de fallas en las inmediaciones del complejo volcánico, con diversos rumbos y dimensiones (ver Figura 3.3). Los principales sistemas de fallas normales son Trigal y Solarpampa, al margen izquierdo del río Colca, que da origen al Valle con el mismo nombre, al NW del CVAS. Luego se encuentra la falla normal Ichupampa, al NE del CVAS y finalmente, el lineamiento Sepina que inicia en el sector noreste del Sabancaya [Mering et al., 1996].

El área de estudio se definió de manera tal de contar con el Complejo Volcánico, incluyendo también parte del Valle del Colca, por lo que el área contiene parte de los sistemas de fallas mencionadas anteriormente y cuenta con un área de aproximadamente 1500 km^2 (ver Figura 3.4). Esta definición se realizó con el objetivo de poder analizar deformación en la corteza debido a fenómenos volcánicos así como también de fenómenos tectónicos asociados a las fallas. Como se mencionó, las señales sísmicas asociadas al volcán Sabancaya más recientes comenzaron en el 2014, por lo que temporalmente el área de estudio se va a analizar desde ese año, que coincide con el inicio de la adquisición de

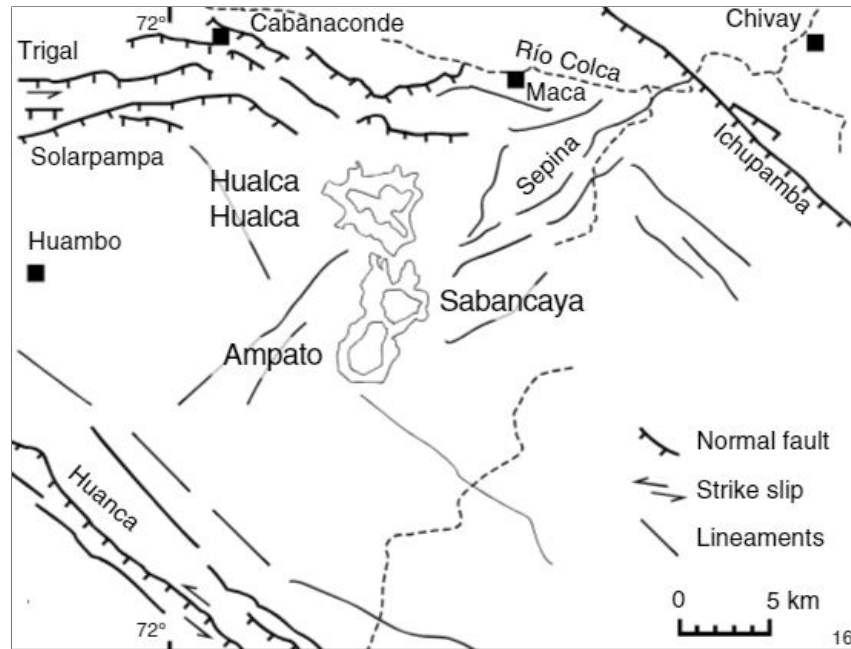


Figura 3.3: Contexto estructural de la región Ampato-Sabancaya, donde se identifican los sistemas de fallas y lineamientos de la región, incluyendo el valle del río Colca. Fuente: modificado de [P et al., 2016]

imágenes de la misión Sentinel-1.

3.2. Aplicaciones previas de DInSAR en el área de estudio.

La técnica DInSAR es una herramienta muy útil a la hora de estudiar la deformación cortical debido a su precisión milimétrica. Esto la convierte en un instrumento con mucho potencial a la hora de analizar actividad volcánica y los efectos de la misma en la corteza en los alrededores de los volcanes [Poland and Zebker, 2022]. En los últimos años con el aumento de conocimiento de la técnica, la mejor calidad de las imágenes, y la mayor disponibilidad de imágenes de acceso abierto, se empezó a utilizar DInSAR como un método complementario en el análisis de los sistemas volcánicos activos, en particular del CVAS

Los primeros aportes en el área de estudio fueron realizados por MacQueen et al.(2020), en donde se realizó un estudio de la interacción volcano-tectónica utilizando imágenes de Sentinel-1 así como otras técnicas complementarias de medición de deformación y su comparación con otros observables volcánicos como datos de campo y sismicidad para lograr establecer una relación entre las fallas circundantes, la presión de fluido en las rocas y la inflación magmática con la actividad sísmica registrada [MacQueen et al., 2020].

En el mismo año Boixart et al.(2020) utilizaron datos de deformación DInSAR y de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) para armar un

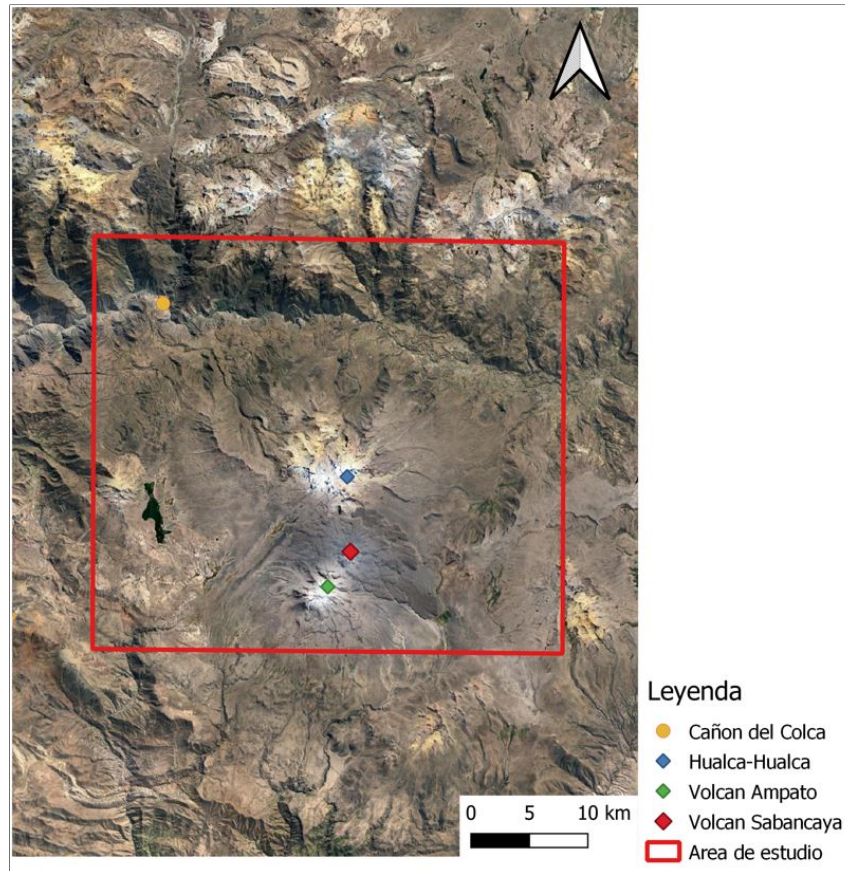


Figura 3.4: Mapa del área de estudio (rectángulo rojo), los volcanes del CVAS y el Cañón del Colca (Naranja)

modelo de fuente del Sabancaya, aportando así al entendimiento de un posible reservorio magmático en profundidad que alimenta la actividad continua del volcán [Boixart et al., 2020].

Por último dos informes del año 2023 analizan por un lado las características de la erupción en un período del 2022 al 2023 [Perú, 2023] y por otro la deformación del Sabancaya y sus alrededores en un período desde 2014 a 2021 utilizando datos de GNSS y DInSAR [del Perú, 2023].

Por lo dicho, la zona presenta gran importancia vulcanológica, pero no hay estudios realizados utilizando la técnica DInSAR a partir de la misión Sentinel-1 antes del 2020 para evaluar la deformación generada por el inicio de la erupción. En particular, no hay estudios que analicen el inicio de la erupción del año 2016.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Selección de imágenes

En este trabajo se buscó procesar e interpretar productos interferométricos con el objetivo de obtener información sobre la deformación cortical generada por la dinámica volcánica. Es por esto, que el primer paso es seleccionar el tipo de imágenes a procesar, teniendo en cuenta la misión satelital que dará origen a dichas imágenes. En esta tesis se trabajó con la misión Sentinel-1, debido a su buena cobertura espacial y disponibilidad de datos, así como también su capacidad de tomar escenas en cualquier condición meteorológica (ver Tabla 4.1). La misión Sentinel-1 posee cuatro modos de adquisición que permiten realizar distintas ventanas espaciales de adquisición en función de la necesidad de estudio (ver Figura 4.1):

- **Interferometric Wide Swath (IW)**: Es el modo de adquisición principal de la superficie ya que satisface la mayoría de los requisitos de servicio. La franja de adquisición es de 250 km en rango, con una resolución espacial de 5 m en rango y 20 m en azimut. La característica principal es que posee tres subfranjas o *subswath* usando el método TOPSAR (Observación del Terreno con Escaneos Progresivos SAR). Cada subfranja contiene una o varias polarizaciones, cada una con una imagen. Finalmente, cada subfranja consta de una serie de ráfagas o *bursts*. Existe un solapamiento entre los *subswath* y los *bursts*. (ver Figura 4.2)
- **Extra-Wide Swath (EW)**: este modo proporciona la mayor cobertura (400 km de ancho de franja) y es adecuado para el monitoreo de áreas muy grandes, como océanos y regiones polares, donde es necesaria una cobertura mucho más amplia que una alta resolución.
- **Stripmap (SM)**: ofrece una resolución mucho más alta a costa de una cobertura más estrecha (80 km). Es utilizado principalmente en monitoreo de infraestructuras o áreas urbanas, donde es necesario mucho más detalle.
- **Wave (WV)**: Adquiere imágenes en una franja muy pequeña y se utiliza principalmente en el monitoreo de olas oceánicas, para modelado y

navegación.

Los productos SAR pueden ser generados en distintos formatos o niveles de procesamiento, disponibles periódicamente de manera gratuita. Estos niveles pueden ser:

- **Nivel 0:** Datos de Radar sin procesar y comprimidos, tal como se reciben del satélite, que se usan directamente.
- **Nivel 1:** Se realiza un procesamiento y focalizado de las imágenes, donde se obtienen dos tipos de subniveles según el algoritmo que se utilice:
 - **Single Look Complex (SLC):** posee datos SAR enfocados y georeferenciados, utilizando la órbita del satélite y su altitud. Los píxeles conservan la información de fase y es por eso que se los utiliza para interferometría.
 - **Ground Range Detected (GRD):** posee datos SAR enfocados, con un filtro conocido como *multilook* aplicado, proyectado en el rango terrestre y corregido geoméricamente. Se pierde la información de fase. Es utilizado en cartografía, monitoreo de desastres, entre otros.

En el caso de este trabajo, como lo que se buscó fue analizar deformación cortical, se requirió la información de fase, una amplia extensión areal y adecuada resolución. Es por eso, que las imágenes seleccionadas fueron aquellas adquiridas con **Modo IW** y **Nivel 1 SLC**.

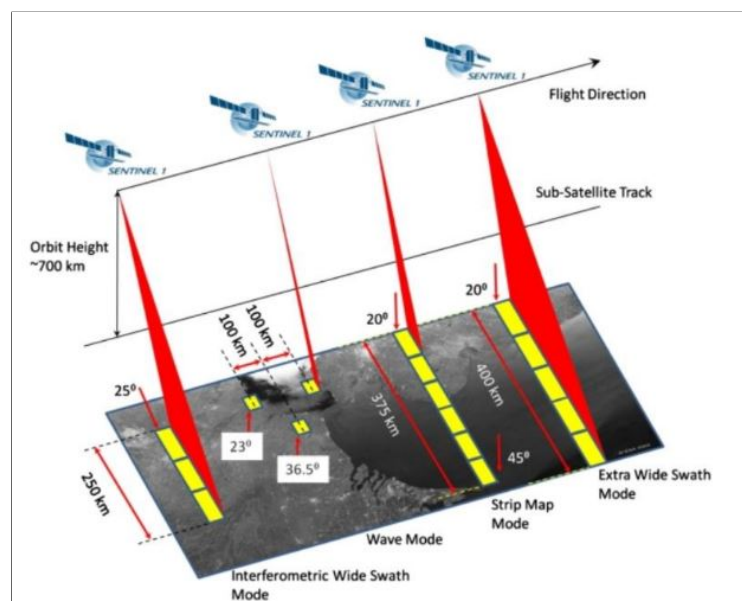


Figura 4.1: Modos de adquisición de Sentinel-1, de izquierda a derecha: Interferometric Wide Swath Mode, Wave Mode, Strip Map Mode y Extra Wide Swath. Fuente: European Space Agency

Aspecto	Descripción
Misión	Sentinel-1
Satélites	Sentinel-1A y Sentinel-1B
Instrumento	Radar de Apertura sintética (SAR)
Operador	Agencia Espacial Europea (ESA)
Objetivo	Monitoreo del medio ambiente y la seguridad, incluyendo el control de deformaciones terrestres, océanos y glaciares.
Frecuencia de Radar	Banda C (5.405 GHz)
Modo de operación	Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Stripmap (SM), Wave (WV)
Resolución espacial	Depende del modo de operación: IW: 5x20 metros EW: 20x40 metros SM: 5x5 metros WV: 5x20 metros
Ancho de barrido	Depende del modo de operación: IW: 250 km EW: 400 km SM: 80 km WV: 20 km
Polarizaciones	Simple: VV o HH o Doble: VV+VH o HH+HV
Repetición temporal	6 días (con los dos satélites)
Altitud orbital	693 km
Inclinación orbital	98.18° (órbita polar)
Acceso	Tipo abierto, disponibles a través de Copernicus Open Access o Alaska Satellite Facilities - Vertex (ASF-Vertex)
Formato de datos	Nivel-1 (SCL-Single Look Complex, GRD-Ground Range Detected) y Nivel-2
Tubo Orbital	+/- 120 metros en funcionamiento normal

Tabla 4.1: Características de Sentinel-1. Fuente: Overview of Sentinel-1 Mission - ESA

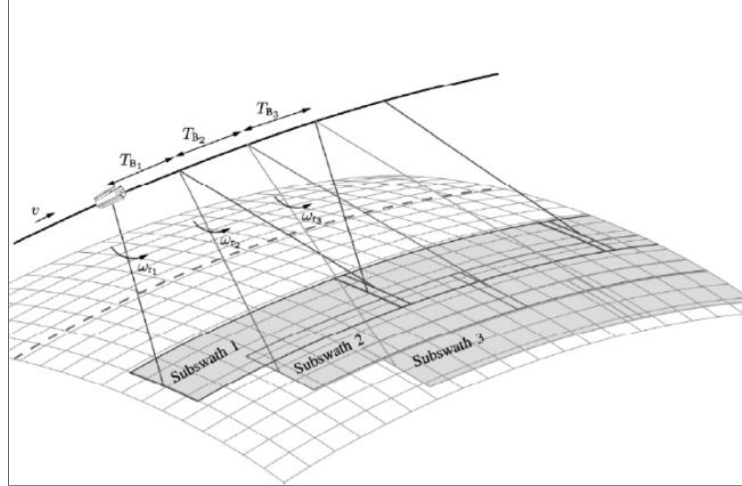


Figura 4.2: Diagrama de la geometría de adquisición TOPSAR, donde se puede ver cada pasada o Subswath. Fuente: [Calvet, 2022]

En la utilización de DInSAR planteamos encontrar pares interferométricos obtenidos en dos momentos diferentes, en donde el evento volcánico relevante quede contenido en el intervalo temporal. Una de las ventajas más importantes a la hora de trabajar con la misión Sentinel-1 es su tubo orbital (ver Tabla 4.1). Dicho tubo se define como un área definida alrededor de la órbita satelital, la cual restringe el movimiento del satélite a lo largo de toda su vida útil. Esto permite que el posicionamiento, al conocerse y ser restringido, posea mayor exactitud, traduciéndose en un aumento de la resolución de los productos.

En este trabajo, las imágenes fueron provistas de manera gratuita por la ASF (Alaska Satellite Facility)¹, que permite mediante un convenio, poder acceder a la base de datos de la Agencia Espacial Europea (ESA) de manera gratuita y en el momento. Las escenas o imágenes pudieron ser obtenidas a demanda, con descarga en el momento, lo que representó una gran ventaja a la hora de generar los productos interferométricos.

Como todo método de medición, posee ciertas limitaciones. Ellas son principalmente que existe una distribución no homogénea temporal y espacialmente de los datos, que no todas las imágenes poseen el mismo nivel de procesamiento y que en el momento de procesar, cuyos pasos se enumeran a continuación, se pueden introducir errores que pueden afectar la interpretación de las imágenes.

Debido a que la actividad sísmica empezó en el año 2014, y la erupción tuvo comienzo el 6 de noviembre de 2016, lo que se hizo fue seleccionar pares de imágenes previas y posteriores al día del inicio de la erupción. Luego, también se seleccionó un intervalo de tiempo más grande para poder analizar la deformación desde antes del inicio, desde el año 2014 hasta el año 2017 con el fin de analizar la deformación del volcán a lo largo del tiempo. También, para poder analizar el efecto de la decorrelación temporal, se realizó una comparación entre imágenes del 2017. Finalmente, con la finalidad de utilizar la técnica para poder estudiar fallas cercanas, se seleccionaron un par de imágenes del

¹<https://search.asf.alaska.edu/#/>

2021. Los criterios de elección de las imágenes fueron:

- Cobertura del área de estudio en su totalidad: este criterio se usó para poder evitar efectos de borde posibles en el procesamiento
- todas las imágenes poseen el nivel de procesamiento Single Look Complex: este criterio se usó porque SLC preserva la información de Fase y Amplitud, siendo la primera aquella con la que deseamos trabajar.
- Misma Ruta: la ruta es la identificación de la órbita. Si dos imágenes poseen una mínima diferencia en la ruta, esto se puede traducir en errores geométricos en la generación del interferograma.
-

Las imágenes seleccionadas fueron aquellas enumeradas en la Tabla 1.2, en donde se asignó una referencia a cada imagen con una letra A o D y un número para luego facilitar la referencia al momento del procesamiento. Por otra parte también se muestran las fechas seleccionadas, en donde se pueden ver los distintos intervalos temporales analizados. También se describe una columna del tipo de pasada u órbita de la imagen (Ascendente o Descendente, ver Figura 4.3). Luego se describe la Ruta, que es un número de identificación de la órbita, y finalmente, el Marco de cada imagen es una referencia geográfica.

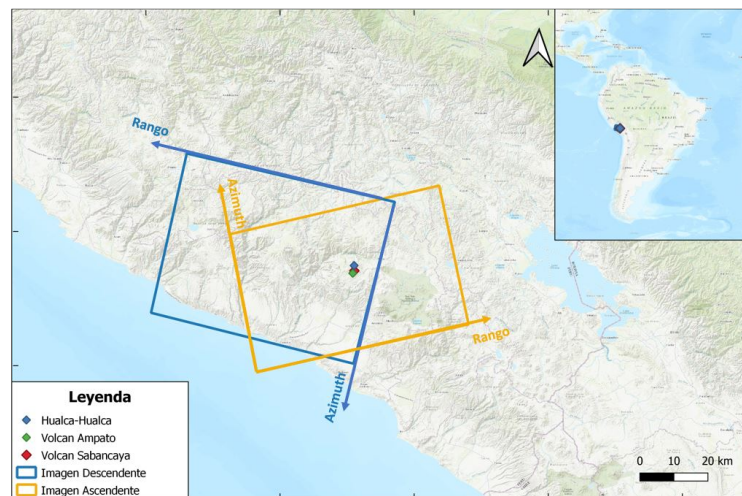


Figura 4.3: Ubicación esquemática de las imágenes procesadas, donde cada escena comprende el área de estudio. Se puede distinguir en Azul las imágenes descendentes y en Naranja, las imágenes ascendentes.

Referencia	Fecha	Orbita	Ruta	Marco
A1	15/10/2016	Ascendente	47	1125
A2	08/11/2016	Ascendente	47	1125
D1	26/10/2016	Descendente	25	643
D2	19/11/2016	Descendente	25	643
A3	08/10/2014	Ascendente	47	1125
A4	16/09/2017	Ascendente	47	1126
D3	12/11/2014	Descendente	25	641
D4	15/09/2017	Descendente	25	641
D5	27/09/2017	Descendente	25	641
A5	19/09/2021	Ascendente	47	1125
A6	13/10/2021	Ascendente	47	1125
D6	18/09/2021	Descendente	25	643
D7	12/10/2021	Descendente	25	643

Tabla 4.2: Tabla de Imágenes seleccionadas. La referencia es aquella utilizada luego en el procesamiento para identificar a las imágenes, la Ruta indica un número de identificación de la órbita en sentido N-S, mientras que el Marco también es una porción geográfica de la imagen capturada que posee un número identificador único. Ambos números sirven para identificar una imagen de Sentinel-1.

4.2. Procesamiento

Una vez definidos los pares de imágenes, se inició la cadena de procesamiento que dió como resultado los productos interferométricos y posteriormente, mapas de deformación del terreno. Si bien existen varios programas de procesamiento de imágenes SAR, en este trabajo se utilizó Sentinel Application Platform (SNAP, por sus siglas en inglés). Este software fue desarrollado por la ESA con el objetivo de proveer a la comunidad científica de una herramienta para procesar las imágenes provistas por la misiones Sentinel. En el procesamiento se siguió un flujo de trabajo (ver Figura 4.4) que inicia en la selección de las imágenes hasta la generación de mapas de deformación, pasando por la construcción de los interferogramas enrollados y desenrollados.

4.2.1. Flujo de Procesamiento.

La cadena de procesamiento interferométrico se describe a continuación, utilizando el flujo esquemático de la Figura 4.4.

1. **Selección de imágenes:** Se seleccionaron las imágenes en función de

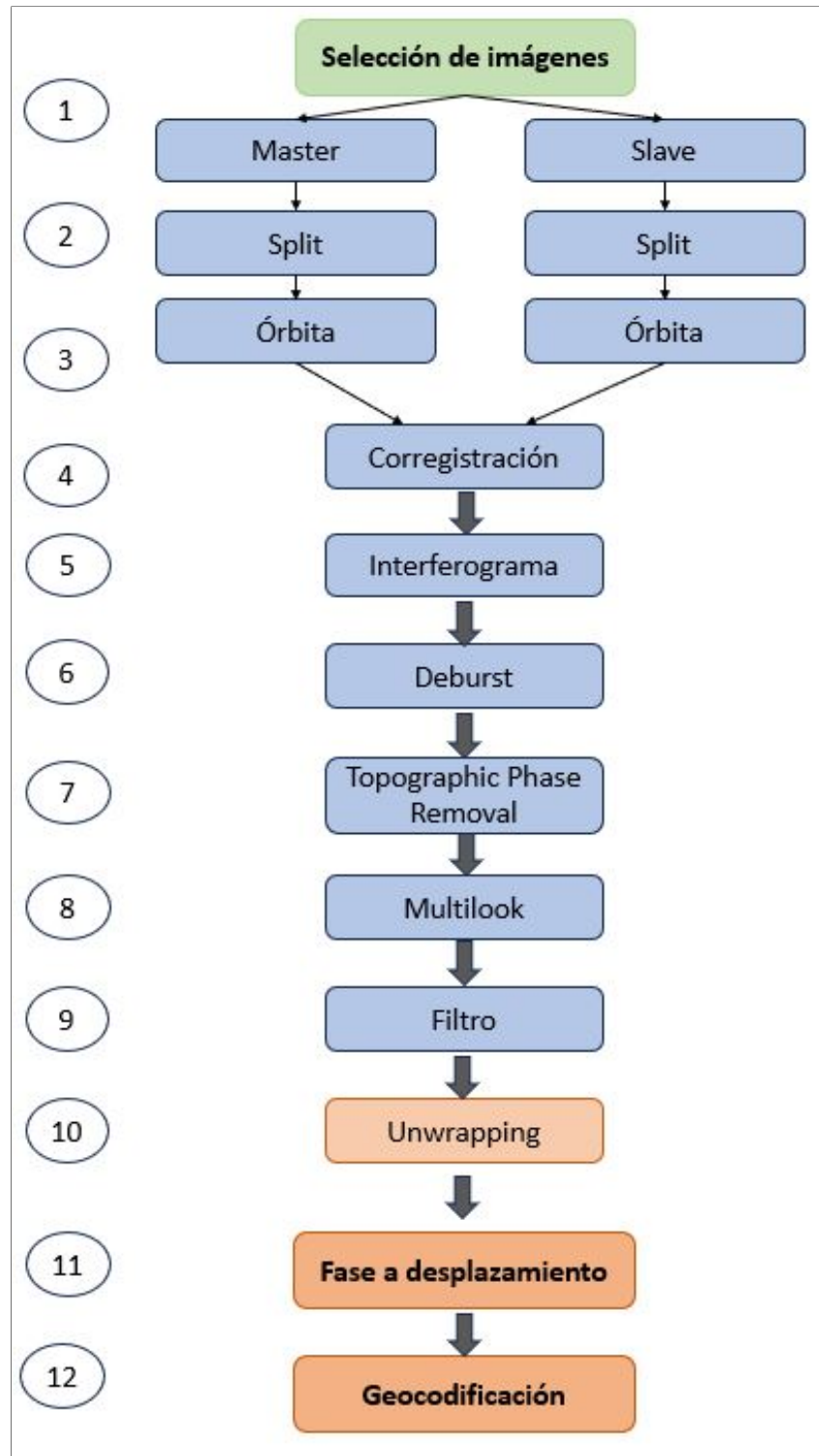


Figura 4.4: Diagrama de procesamiento interferométrico de imágenes Sentinel-1 tipo IW SLC. Fuente: elaboración propia basada de [Amin et al., 2021]

la actividad eruptiva del volcán. La imagen adquirida al principio es la imagen principal (*master*) y la imagen adquirida luego es la secundaria (*slave*). Esta convención es importante porque luego, en el paso 3 de

Corregistación, se deben tener definidas las imágenes de referencia. Estas imágenes se cargan al software. Como el formato de los metadatos de las imágenes son compatibles con el software de procesamiento, no será necesario pasarlos a otro formato.

2. **Split:** Cada escena tiene una área de aproximadamente 60000 km² (ver Figura 4.3). Procesar y obtener un interferograma de toda el área se puede lograr pero tiene mucho costo computacional. Es por eso que se aplicó el *split*, ya que estamos en una adquisición de tipo TOPSAR. Lo que se hizo fue seleccionar el subswath que comprenda el área de estudio y la polarización que se desee (en este caso siempre se va a trabajar con polarización VV en todos los procesamientos). Finalmente, en el caso de los *burst* o ráfagas presentes dentro de cada subswath, se tienen de una a nueve ráfagas. El intervalo de ráfagas también puede elegirse para achicar el área de la imagen a procesar. En este caso se seleccionaron el subswath IW2 y IW1 para las imágenes ascendentes y descendentes respectivamente, donde para todas las imágenes se eligió la polarización VV y burst de 3 o 5 a 9 dependiendo de la imagen (ver Tabla 4.3).

Referencia	Subswath	Polarización	Burst
A1	IW2	VV	5 a 9
A2	IW2	VV	5 a 9
D1	IW1	VV	5 a 9
D2	IW1	VV	5 a 9
A3	IW2	VV	3 a 9
A4	IW2	VV	3 a 9
D3	IW1	VV	5 a 9
D4	IW1	VV	5 a 9
D5	IW1	VV	5 a 9
A5	IW2	VV	5 a 9
A6	IW2	VV	5 a 9
D6	IW2	VV	4 a 9
D7	IW2	VV	4 a 9

Tabla 4.3: Split aplicado a las imágenes seleccionadas.

3. **Órbita satelital:** El paso siguiente fue aplicar los archivos de órbita a las imágenes. Su utilidad se debe a que estos archivos contienen información precisa sobre la posición y la velocidad del satélite en su órbita, esto es crucial para poder corregir cualquier error geométrico en los datos SAR. Sin esta corrección, la georreferenciación y la corregistación serían

mucho menos precisas. En este caso, para todas las imágenes se aplicaron correcciones utilizando **órbitas precisas de Sentinel**.

4. **Corregistración:** Una vez aplicados el split y el archivo de orbita a cada imagen, es tiempo de alinearlas píxel a píxel. Se seleccionó una imagen principal, adquirida primero, y otra secundaria, adquirida después. El alineamiento se realizó a partir de la imagen principal. En base al procesamiento estándar para este tipo de imágenes, la imagen secundaria se remuestreó, se le realizó una compresión en el rango, en el dominio de las frecuencias y se le quitó la modulación que contiene. Esto permitió simplificar la estructura de la señal secundaria para trabajar con ella.

Luego, se realizó, sobre la señal secundaria ya simplificada, una interpolación sinc truncada, con el objetivo de remuestrear la imagen secundaria en las coordenadas de la imagen principal. Para esta interpolación se utilizó un DEM de referencia, que en este caso es utilizado el Shuttle Radar Topography Mission de 3 segundos de arco, o SRTM 3sec^[2], por sus siglas en inglés. Este DEM es provisto por la NASA y fue utilizado principalmente por sus ventajas en la cobertura espacial del planeta, cubriendo obviamente el área de estudio, y por su alta resolución. Finalmente se vuelve a aplicar la modulación y la descompresión de rango a la imagen secundaria interpolada.

5. **Interferograma:** La formación del interferograma se realiza a partir de la multiplicación cruzada píxel a píxel de las dos imágenes SLC. Cada píxel es un número complejo que depende del rango ρ y el azimut α , ubicados en un vector $\vec{x} = (\rho, \alpha)$:

$$P(\vec{x}) = A(\vec{x})e^{i\phi(\vec{x})} \quad (4.1)$$

Donde $A(\vec{x})$ es la amplitud y $\phi(\vec{x})$ es la fase. Por lo tanto, la multiplicación cruzada del píxel de la imagen principal P_1 y la imagen secundaria P_2 será:

$$P_1 \cdot P_2^* = A_1 A_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \quad (4.2)$$

De esta ecuación se obtuvo la diferencia de fase que interesa en interferometría, recordando la Ecuación 2.11 y sus términos. En este caso se aplicó un aplanamiento, en el cual se utiliza un filtro para remover la componente de fase de tierra plana, que se debe a la variación de fase esperada debido a la curvatura terrestre. Se utilizó un polinomio de grado 5, que es suficiente para modelar la fase terrestre en una imagen SAR completa.

En este paso, se obtuvieron como productos, las bandas de la parte real e imaginaria de la multiplicación cruzada, así como también la posibilidad de obtener bandas virtuales (es decir, calculadas) de intensidad y

²<https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>

fase. Esta última es aquella que se interpreta como interferograma. Es importante mencionar también que en este paso se calculó la coherencia entre las imágenes, un factor muy importante a la hora de interpretar los productos. La coherencia es el nivel de correlación entre las dos imágenes. Cuando la coherencia es elevada ($>0,7$), se pueden obtener precisiones en el alineamiento del orden de 0,1 píxel. Por otro lado, si la coherencia es baja (entre 0,7 y 0,3), la precisión puede ser menor que 1 píxel. En casos donde la coherencia es aún más baja, el cálculo del interferograma fallan es decir, que las imágenes no son comparables y por ende el interferograma no es interpretable.

6. **Deburst:** la adquisición de las imágenes se realiza en ráfagas, que luego se unen para eliminar los solapamientos. Realizar una corrección de desalineaciones entre ráfagas, asegurando que la fase de la señal de radar sea continua a través de los bordes de las ráfagas, lo cual es crucial para el análisis interferométrico. En la Figura 4.5 se puede ver una imagen de ejemplo con los correspondientes subswaths y se pueden ver las ráfagas separadas, que luego pueden ser unidas con el deburst.

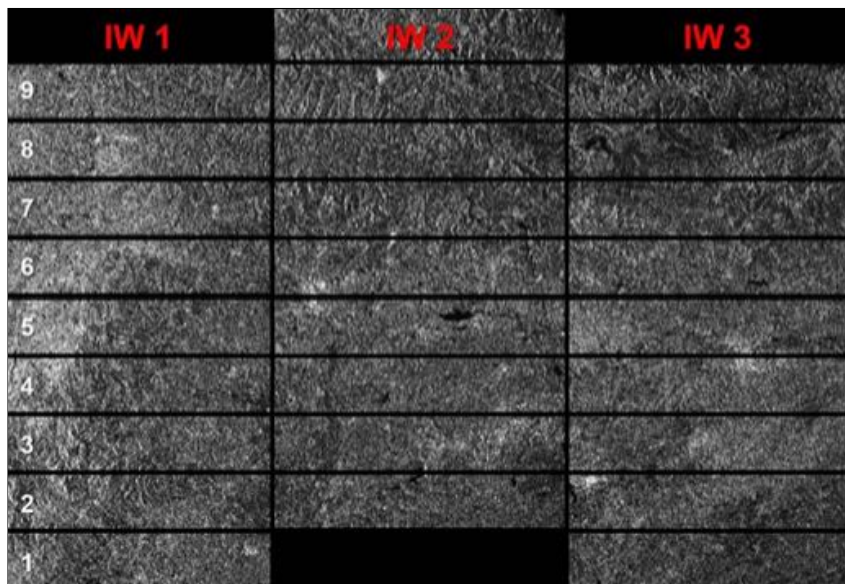


Figura 4.5: Ejemplo de una imagen SAR completa, con los 3 subswath y los 9 deburst correspondientes al modo IW. Fuente: SNAP tutorial.

7. **Topographic Phase Removal:** Este es uno de los pasos más importantes, ya que se consolida como producto DInSAR a la imagen obtenida. Recordando la ecuación 2.11, lo que se busca encontrar en última instancia es $\Delta\phi_{disp}$, que contiene la información de deformación del terreno. Para obtener ese término entonces, es necesario conocer $\Delta\phi_{topo}$, definida como la fase topográfica. Como es una incógnita, lo que se hace es modelarla a partir de un DEM preciso en la zona de interés. Luego, esta fase modelada se resta a la fase interferométrica observada. En este caso, se

volvió a utilizar SRTM 3sec para mantener la consistencia a lo largo del procesamiento. De esta manera, el interferograma resultante contiene como señal principal la deformación del terreno junto con posibles errores y ruidos residuales.

8. **Multilook:** Usualmente, un interferograma suele aparecer con ruido inherente conocido como *speckle*, que consiste en un patrón granular que puede dificultar la interpretación visual. En este paso, lo que se hizo fue promediar múltiples "*looks*" independientes de la misma escena para reducir ese ruido. Funciona como un filtro que utiliza a la misma imagen, la divide en subpartes (generalmente en el dominio de Fourier, donde la imagen se descompone en diferentes bandas de frecuencia), se promedia (en amplitud o en intensidad) y se aplica ese producto a la imagen original. El multilook se puede aplicar armando grillas cuadradas o rectangulares en dirección de Rango y Azimut.

Un efecto no deseado del multilooking es la reducción de la resolución espacial de la imagen. El multilook entonces es una relación de compromiso entre la reducción de ruido y la reducción de la resolución. En el caso de las imágenes con alta decorrelación temporal (A3-A4 y D3-D4) se priorizó un factor de multilook mucho mayor que los otros interferogramas debido a la elevada presencia de ruido aleatorio en el interferograma.

En este caso se empleó un factor de multilook de 4x1 para todas las imágenes menos para aquellas del intervalo temporal más largo, desde 2014 a 2017. Esto se hizo para obtener al final un píxel cuadrado y reducir el ruido inherente de los interferogramas. Para el intervalo más largo mencionado, se utilizó un factor de multilook de 40x10 debido a que la decorrelación temporal incorpora ruido aleatorio, por lo que necesita un factor mucho más intenso para lograr interpretar mejor los productos (ver Cuadro 4.4).

Pares (Master-Slave)	Factor Multilook (Rango x Azimuth)
A1 - A2	4 x 1
D1 - D2	4 x 1
A3 - A4	40 x 10
D3 - D4	40 x 10
D4 - D5	4 x 1
A5 - A6	4 x 1
D6 - D7	4 x 1

Tabla 4.4: Factores de Multilook aplicados a cada par interferométrico con Rango y Azimut.

9. **Filtro:** Los filtros aplicados luego del procesamiento buscan mejorar la calidad de las imágenes. Existen varios tipos de filtros en el caso de DInSAR. Algunos de los más comunes son:

- **Filtros isotrópicos:** se caracterizan por su invariabilidad en todas las direcciones, es decir, su respuesta es la misma independientemente de la orientación de la estructura que se esté filtrando. Algunos ejemplos pueden ser: de tipo Gaussiano, promedios, filtros caja, entre otros.
- **Filtros de frecuencia:** en este caso se pasa al dominio de las frecuencias, y se puede aplicar filtros pasa-bajas, filtrando las frecuencias altas, que suelen representar al ruido.
- **Filtros de fase:** Son los más utilizados para la extracción precisa de deformaciones. El más conocido es el Filtro de Goldstein, que es adaptativo y utiliza distintas técnicas en el dominio de la frecuencia y el espacio para atenuar el ruido mientras se preserva la señal útil. Primero lo que se hace es llevar la señal al dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT), en ventanas que pueden ser seleccionadas de distinto tamaño. Luego, se aplica en ese dominio una máscara que atenúa componentes de alta frecuencia, donde dicha máscara es adaptativa, ajustándose a las características del ruido y la señal en la imagen. Esa adaptación se realiza en función de la coherencia de la fase. A mayor coherencia, el filtro es más suave, mientras que en áreas de baja coherencia, el filtro es más agresivo. Finalmente, se regresa al dominio espacial mediante la transformada rápida de Fourier inversa FFT^{-1}

En este trabajo se utilizó el **filtro de Goldstein** [Goldstein and Wegner, 1998] para todas las imágenes. Los parámetros del mismo para todas las imágenes fueron una ventana de un tamaño de 5×5 y un tamaño de ventana de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de 64. Estos parámetros se eligieron a partir de pruebas sucesivas en donde los valores mencionados fueron los más adecuados.

10. **Desenrollado de Fase:** Hasta este punto, las imágenes que se obtuvieron y se filtraron contienen la información de fase enrollada, es decir, contenidas en un intervalo contenido en $[-\pi, \pi)$. Para poder lograr encontrar los mapas de deformación, primero es necesario desenrollar la fase, que no es un problema trivial debido a la ambigüedad y la no linealidad. Como tenemos la fase interferométrica observada ϕ_{obs} en un punto (x, y) , se puede expresar como:

$$\phi_{obs}(x, y) = \phi_{true}(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (4.3)$$

donde $\phi_{true}(x, y)$ es la fase verdadera continua y $k(x, y)$ es un número entero que representa el número de ciclos de 2π envueltos. El objetivo es

poder hallar k en cada píxel para poder recuperar $\phi_{true}(x, y)$:

$$\phi_{true}(x, y) = \phi_{obs}(x, y) - 2\pi k(x, y) \quad (4.4)$$

Para realizar el cálculo matemáticamente, se trata de reconstruir la fase desenrollada a partir de las diferencias de fase entre píxeles vecinos, basándose en dos hipótesis muy importante: el gradiente de la fase enrollada es igual al gradiente de la fase verdadera. Además, la fase verdadera debe variar suavemente por lo que el gradiente de esta fase verdadera es pequeño y no es afectado por el ruido. Los gradientes de las fase verdadera y enrollada toman relevancia debido a que el desenrollado se realiza integrando dichos gradientes, comenzando en una posición arbitraria, por lo que un error en el cálculo de uno de los gradientes puede llevar a errores que se van a propagar por toda la imagen [Hanssen, 2001].

Hay varios métodos de desenrollado de fase [Hanssen, 2001] [Goldstein et al., 1988], algunos de los principales son:

- Método residue-cut (branch-cut): como el gradiente de la fase desenrollada no se conoce, se utiliza la condición de suavidad de la fase y se calcula un residuo de la fase para un píxel arbitrario (i, j) y sus píxeles vecinos. En éste método específico, el algoritmo comienza en un punto arbitrario, calcula el residuo y luego en una ventana de 3×3 píxeles busca otro. Si hay un residuo con diferente signo, se aplica una unión entre esos píxeles y se continúa hacia otro píxel calculando el residuo nuevamente hasta armar un "árbol", en donde quedan conectados todos los residuos y el algoritmo se detiene [Hanssen, 2001].
- Método de Mínimos Cuadrados: busca minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre la fase observada y la desenrollada. La función objetivo a minimizar será:

$$\min \sum_{(i,j)} (\Delta\phi_{obs}(i, j) - \Delta\phi_{unwrapped}(i, j))^2 \quad (4.5)$$

donde $\Delta\phi_{obs}(i, j)$ es la diferencia de la fase observada entre los píxeles vecinos y $\Delta\phi_{unwrapped}(i, j)$ es la diferencia de fase desenrollada. En este caso, se pueden aplicar técnicas de filtrado FFT para resolver el problema de forma más eficiente.

- Métodos de Flujo de Costo Mínimo: busca minimizar el costo asociado con el ajuste de las discontinuidades de fase y se basa en la representación del problema de desenrollado como un problema de flujo en una red. La red va a estar compuesta por nodos y aristas, donde cada nodo (i, j) es un píxel y cada arista es la diferencia de fase entre píxeles vecinos (i, j) , $(i+1, j)$ y $(i, j+1)$.

Sin embargo, la premisa más importante del método es que la diferencia de fase observada entre píxeles vecinos se puede ajustar

añadiendo múltiplos de 2π . Así, el objetivo es encontrar un conjunto de ajustes k_{ij} (números enteros) que minimicen el costo total de desenrollar la fase. Para asegurar la consistencia global, se debe cumplir la conservación del flujo en cada nodo, es decir, la suma de los flujos que entran y salen de cada nodo debe ser cero. La función de costos a minimizar es:

$$F = \sum_{(i,j)} [\Delta\phi_{true}(i,j) - \Delta\phi_{obs}(i,j) - 2\pi k_{ij}]^2 \quad (4.6)$$

En este trabajo, para todos los casos se utilizó el método de **Flujo de Costo Mínimo** [Chen and Zebker, 2002], donde inicialmente se calcula el costo estadístico de cada arista basado en la diferencia de fase observada y la coherencia de la señal. Se eligió este método debido a que busca un enfoque global en la minimización de la función de costo y tiene mayor adaptabilidad al ruido.

11. **Fase a desplazamiento:** Una vez que ya se cuenta con la fase desenrollada, recordando la ecuación 2.9, se calcularon los mapas de deformación en la dirección de LOS (Line of Sight):

$$d_{LOS} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_{unwrapped} \quad (4.7)$$

donde $\lambda = 5.6$ cm por tratarse de la misión Sentinel-1, que opera en Banda C (ver Tabla 2.1)

12. **Geocodificación:** Este último paso es aquel que va a georreferenciar el mapa final. Consiste en transformar las coordenadas de una imagen SAR desde el sistema de referencia de la imagen (coordenadas de píxel y línea) al sistema de referencia geográfico (latitud, longitud o coordenadas proyectadas). Este paso es crucial para poder integrar las imágenes con otros datos geográficos, como lo pueden ser imágenes satelitales de topografía. En este caso el sistema de coordenadas elegido fue WGS84, mientras que el DEM utilizado fue nuevamente SRMT 3sec.

4.2.2. Descomposición de la deformación.

Si bien en la cadena de procesamiento se obtiene la deformación de cada punto dentro del área de estudio, la misma será en la línea de visión (o LOS, por sus siglas en inglés) del satélite. La deformación se trata de una composición vectorial a lo largo de esa línea, siendo una proyección del movimiento total del terreno en la dirección del satélite. Por esta razón, va a estar compuesta por componentes de desplazamiento tanto horizontales (este-oeste y nortesur) como verticales (arriba-abajo). Para poder interpretar correctamente el desplazamiento del terreno, se puede realizar una descomposición utilizando la combinación de la deformación del terreno en LOS de una pasada ascendente y descendente (ver Figura 4.6)

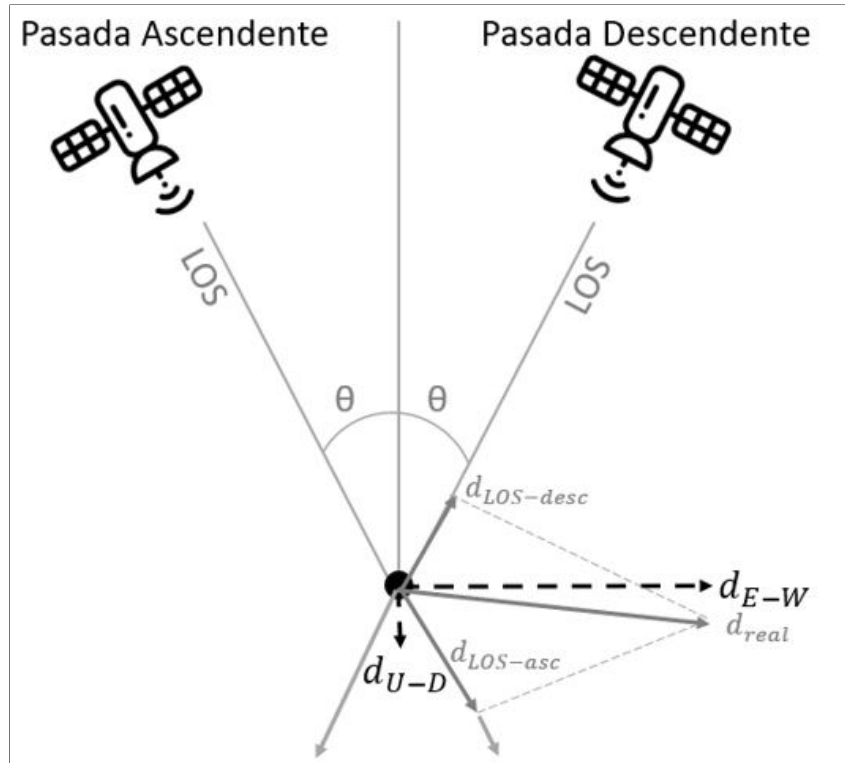


Figura 4.6: Descomposición vectorial del desplazamiento en LOS para órbitas ascendente y descendente. Se pueden ver los vectores de desplazamiento en la dirección de LOS en la dirección ascendente y descendente. Luego, estos vectores se descomponen en la componente vertical y este-oeste. Fuente: modificado de [Bischoff et al., 2020]

Según esta descomposición, se desprende la deformación en la dirección Este-Oeste (d_{EW}) y en la dirección vertical (d_{UP}). Es importante mencionar que para hallar la componente norte-sur es necesario una tercera pasada satelital para poder resolver el sistema de ecuaciones de tres incógnitas, y complicaría mucho la resolución. Usualmente esta componente se considera muy pequeña y se desprecia [Hanssen, 2001].

Recordando del Capítulo 1, sea θ el ángulo de incidencia entre la vertical y la línea de visión del radar, y ϕ el ángulo de azimut, por trigonometría, la relación entre la deformación en LOS para cada pasada y las componentes de deformación real (d_{EW}, d_{NS}, d_{UP}) según [Hanssen, 2001] son:

$$d_{LOS}^{asc} = d_{EW} \text{sen}(\phi_{asc}) \text{sen}(\theta) + d_{NS} \text{cos}(\phi_{asc}) \text{sen}(\theta) + d_{UP} \text{cos}(\theta) \quad (4.8)$$

$$d_{LOS}^{des} = d_{EW} \text{sen}(\phi_{des}) \text{sen}(\theta) + d_{NS} \text{cos}(\phi_{des}) \text{sen}(\theta) + d_{UP} \text{cos}(\theta) \quad (4.9)$$

donde ϕ_{asc} y ϕ_{des} típicamente tienen valores de $\phi_{asc} = 90^\circ$ y $\phi_{des} = 270^\circ$. Simplificando las ecuaciones anteriores con los valores de azimut, las ecuaciones se reducen a:

$$d_{LOS}^{asc} = d_{EW} \text{sen}(\theta) + d_{UP} \text{cos}(\theta) \quad (4.10)$$

$$d_{LOS}^{des} = d_{EW} \text{sen}(\theta) + d_{UP} \text{cos}(\theta) \quad (4.11)$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, las componentes de la deformación real se pueden calcular como:

$$d_{EW} = \frac{d_{LOS}^{asc} - d_{LOS}^{des}}{2 \text{sen}(\theta)} \quad (4.12)$$

$$d_{UP} = \frac{d_{LOS}^{asc} + d_{LOS}^{des}}{2 \text{cos}(\theta)} \quad (4.13)$$

En este trabajo, se realizó la descomposición para el caso del año 2016 y para el análisis entre los años 2014 a 2017, utilizando un ángulo de incidencia θ considerado constante de 36° , debido a la latitud de la zona de estudio y a las órbitas.

Capítulo 5

Resultados

En base a la cadena de procesamiento aplicado (ver Figura 4.4), en este Capítulo se presentan los resultados obtenidos utilizando la técnica DInSAR con el objetivo de poder comparar la coherencia interferométrica a lo largo del tiempo y la deformación en la zona de estudio. Primero se realizó el procesamiento para el año 2016 (A1-A2, D1-D2), año en el cual empezó el proceso eruptivo que continúa hasta la actualidad. Luego se procesó un intervalo mucho más largo temporalmente, desde 2014 a 2017 (A3-A4, D3-D4). Luego, se procesaron también imágenes de pasada descendente del año 2017 con una línea base temporal más pequeña para poder ver los efectos del intervalo temporal en la coherencia interferométrica (D4-D5). Finalmente, se procesaron imágenes en pasadas ascendente y descendente del año 2021 con el objetivo de poder visualizar e interpretar la manifestación de las fallas de la zona de estudio (A5-A6, D6-D7) (ver Tabla 4.2).

5.1. 2016

Recordando la Tabla 4.2 (capítulo anterior), y que el período eruptivo actual comenzó el 6 de noviembre de 2016 las imágenes seleccionadas fueron en pasadas ascendente desde el **15/10/2016 al 8/11/2016**, mientras que las imágenes de pasada descendente seleccionadas fueron del **26/10/2016 al 19/11/2016**. Ambas imágenes se procesaron con los mismos parámetros de Split, y al momento de realizar el interferograma, se obtuvo la siguiente información sobre las líneas bases temporal y perpendicular (ver Tabla 5.1)

Pares (Master-Slave)	B_T (días)	B_{\perp} (metros)
A1 - A2	24	35.01
D1 - D2	24	14.09

Tabla 5.1: Pares de imágenes seleccionadas en el año 2016 para el análisis junto con su respectiva línea base temporal y espacial.

La **resolución** obtenida para cada imagen una vez aplicada toda la cadena

de procesamiento es de 20 m en Rango y 20 m en Azimut.

5.1.1. Pasada Ascendente

- **Coherencia**

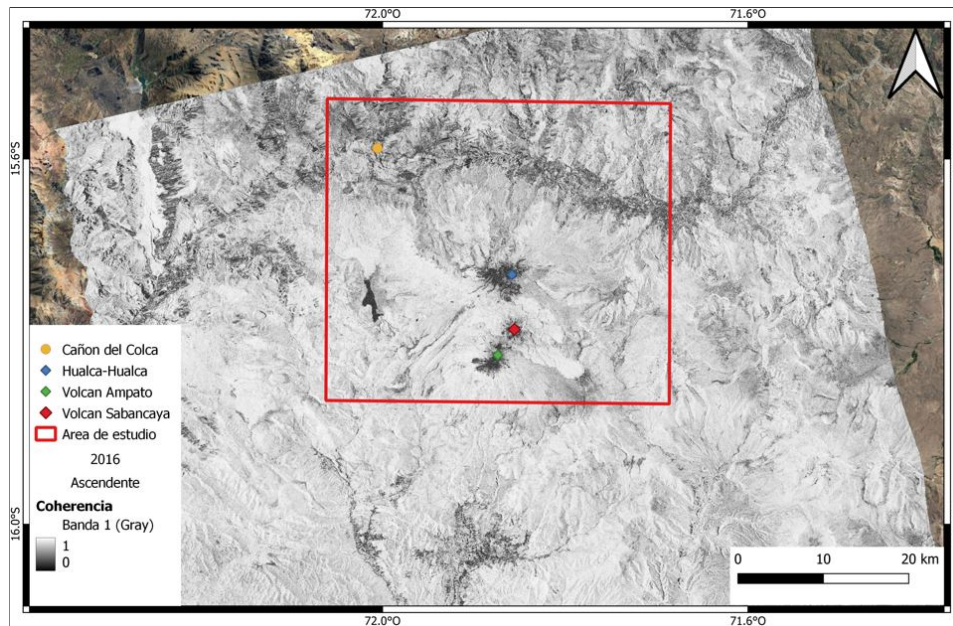


Figura 5.1: Mapa de coherencia interferométrica en pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016

Se puede apreciar en este caso que el interferograma tiene alta a muy alta coherencia ($>0,7$) a lo largo de la mayor parte del interferograma, excepto en las zonas de topografía más compleja, como lo es a lo largo del Cañón del Colca (punto naranja en el borde noroeste de la zona de estudio). También se puede apreciar una fuerte pérdida de coherencia en los tres volcanes que comprenden el CVAS. Esto podría deberse a cambios en la superficie generados a partir de la erupción de material proveniente del Sabancaya. Se puede observar desde el Sabancaya extendiéndose hasta el SE una sección de muy alta coherencia. Esto podría deberse a una colada de lava, que al ser una superficie homogénea, sin vegetación, posee muy alta coherencia debido a que la superficie no varía en el tiempo.

- **Fase enrollada**

El interferograma de fase enrollada (ver Figura 5.2), muestra distorsiones de las franjas interferométricas más pronunciadas a lo largo del Cañón del Colca, que también es debido a la topografía negativa tan pronunciada. Por otro lado, las franjas no cambian mucho alrededor del Volcán Sabancaya.

- **Fase desenrollada**

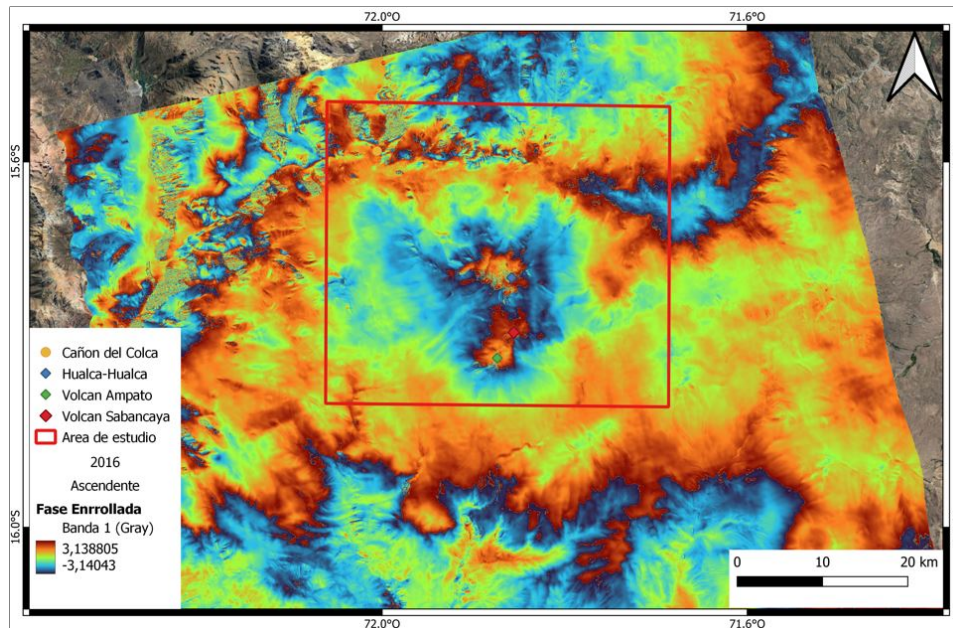


Figura 5.2: Mapa de fase enrollada en radianes de pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016

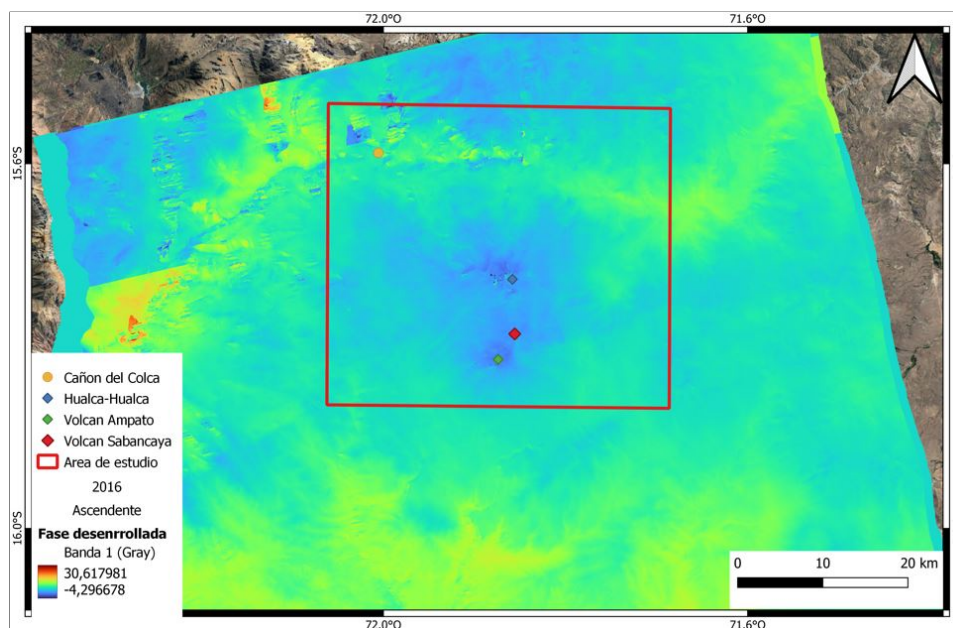


Figura 5.3: Mapa de fase desenrollada de pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016

Para la fase desenrollada (ver Figura 5.3) se puede ver que en la zona del CVAS la fase disminuye un poco más que en el resto de las zonas. Esto es un primer indicio de la deformación del área generada por la erupción del Sabancaya, debido a que la fase desenrollada está relacionada con el desplazamiento (Ec. 2.9). Por otra parte, la observación evidencia la presencia de ruido a lo largo del Cañón del Colca. Esto se debe a que los

parámetros seleccionados para la aplicación del algoritmo corresponden a la zona de estudio, lo cual implica la posible existencia de ruido en zonas particulares como lo son valles pronunciados.

■ Desplazamiento en la dirección de LOS

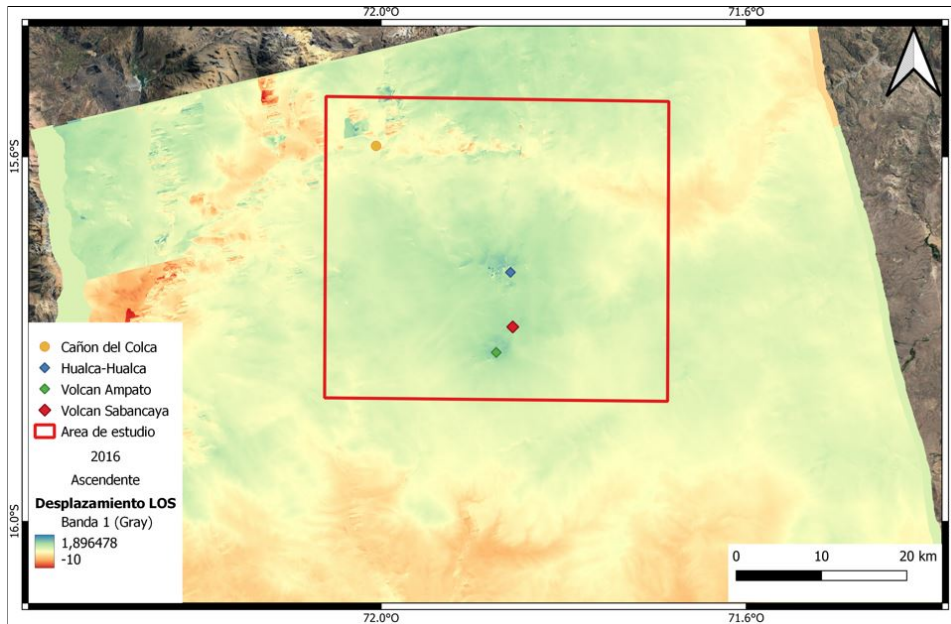


Figura 5.4: Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del radar en pasada ascendente para las fechas: 15/10/2016 al 8/11/2016

La Ecuación 2.9 relaciona la fase desenrollada con el desplazamiento en la dirección de Línea de Vista del Radar, donde la longitud de onda utilizada es $\lambda=5.6$ cm. Es por esto, que el resultado que se obtiene tiene como unidad los centímetros. Se puede apreciar en la zona del CVAS que hay un leve desplazamiento positivo de aproximadamente 1.8 cm (ver Figura 5.4). Nuevamente en la zona del Cañón del Colca se puede ver el ruido generado por el algoritmo en el desenrollado de fase, por lo cual es posible desestimar ese resultado en las interpretaciones.

5.1.2. Pasada Descendente

■ Coherencia

Análogamente a la coherencia en pasada ascendente, se puede ver coherencia alta a lo largo del interferograma de pasada descendente (ver Figura 5.5). También se visualiza que el Cañón del Colca genera la pérdida de coherencia y en la cima de los volcanes correspondientes al CVAS. También se puede ver la colada de lava extendiéndose desde el volcán Sabancaya.

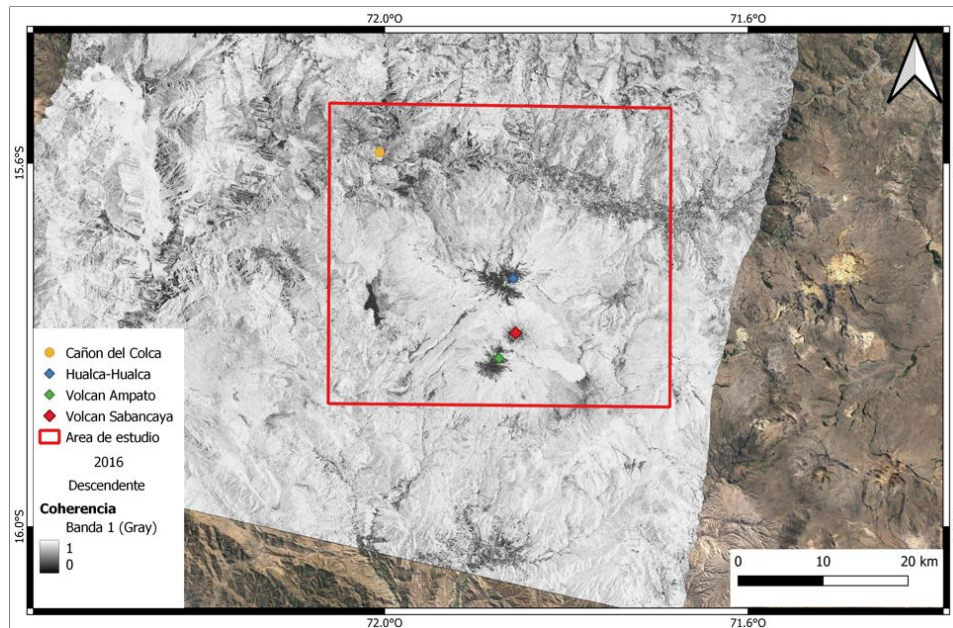


Figura 5.5: Mapa de coherencia interferométrica en pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016

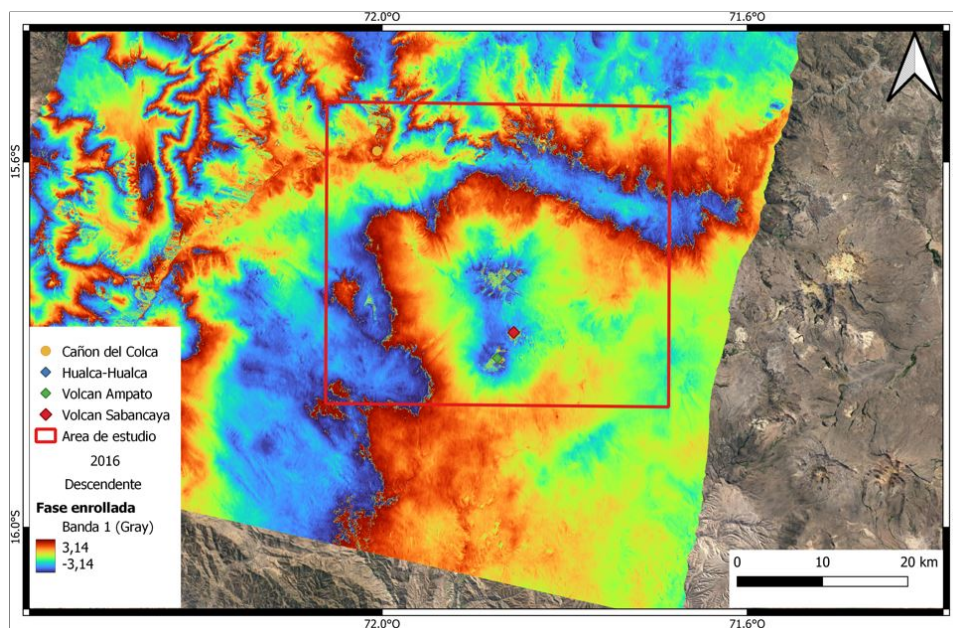


Figura 5.6: Mapa de fase enrollada en radianes de pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016

■ Fase enrollada

Nuevamente se visualiza el cambio de las franjas interferométricas en la región del Cañón del Colca, mientras que en la zona del Sabancaya, la variación es muy pequeña (ver Figura 5.6). Es importante recordar que los interferogramas producto de pasadas ascendentes y descendentes poseen fechas distintas, aunque cercanas entre sí, y que la geometría

de observación es diferente, por lo que los interferogramas no van a ser iguales, aunque si pueden ser comparables entre sí.

- **Fase desenrollada**

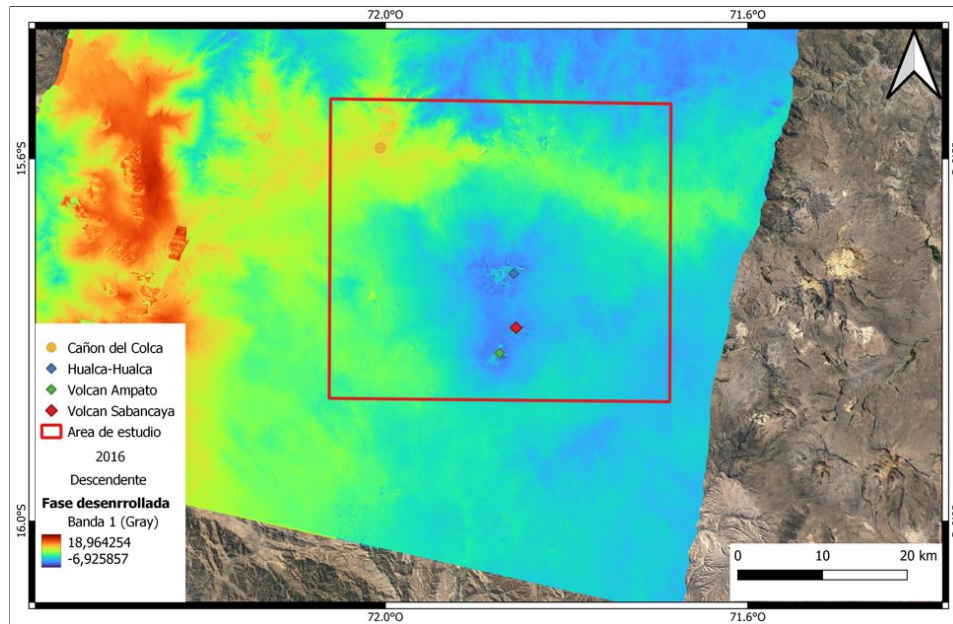


Figura 5.7: Mapa de fase desenrollada de pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016

En el caso de la fase desenrollada (ver Figura 5.6), es importante recordar que al ser pasada descendente, tiene una LOS opuesta a la pasada ascendente. Por lo tanto, el interferograma de este tipo de fase no va a ser igual que al de pasada ascendente. Lo que sí se puede ver es una disminución nuevamente de la fase en la zona del volcán.

- **Desplazamiento en la dirección de LOS**

En el caso del desplazamiento en LOS (ver Figura 5.8), lo que se puede ver es un desplazamiento positivo de aproximadamente 3 cm alrededor del CVAS.

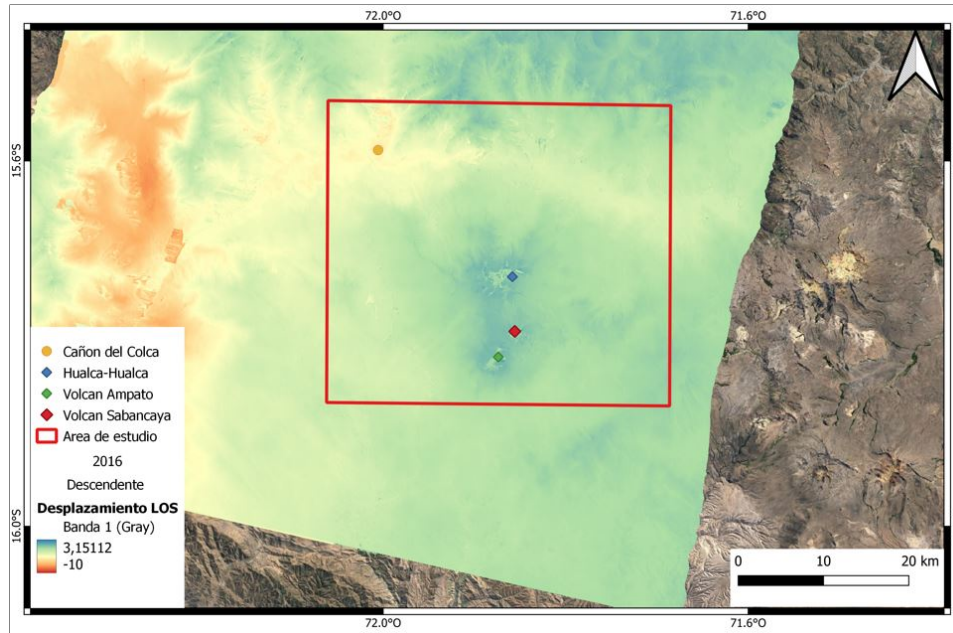


Figura 5.8: Mapa de desplazamiento en la dirección de vista del Radar en pasada descendente para las fechas: 26/10/2016 al 19/11/2016

5.2. Intervalo 2014 a 2017

Con el objetivo de poder analizar el sistema eruptivo en un intervalo más grande de tiempo, se eligieron imágenes desde 2014 a 2017, conteniendo la erupción en este intervalo. El intervalo ascendente es desde el **08/10/2014 a 16/09/2017** y el descendente va desde **12/11/2014 a 15/09/2017**. Se realizó el procesamiento de las imágenes A3-A4 y D3-D4 siendo imagen *master* y *slave*, respectivamente. Nuevamente, ambos interferogramas se realizaron con los mismos parámetros de *split* y con los mismos parámetros de *multilook*, con el fin de disminuir el ruido interferométrico. Al realizar el procesamiento de las imágenes, al momento de la corrección se obtuvieron líneas bases temporales y perpendiculares (ver Tabla 5.2) y se puede ver que la línea base temporal para ambos pares es muy larga, y la línea base perpendicular es mayor que en el caso anterior. Para el caso de Sentinel-1, la línea base perpendicular máxima es de aproximadamente 300 metros, por lo que estos pares están dentro del rango tolerable para realizar el análisis sin introducir errores por decorrelación geométrica.

Pares (Master-Slave)	B_T (días)	B_{\perp} (metros)
A3 - A4	1074	130.18
D3 - D4	1038	112.04

Tabla 5.2: Pares de imágenes seleccionadas en los años 2014 a 2017 para el análisis junto con su respectiva línea base temporal y espacial.

Como en este caso los parámetros de *multilook* se cambiaron a 40x10, la **resolución** obtenida para cada imagen una vez aplicada toda la cadena de procesamiento es de 150 m en Rango y 150 m en Azimut.

5.2.1. Pasada Ascendente

■ Coherencia

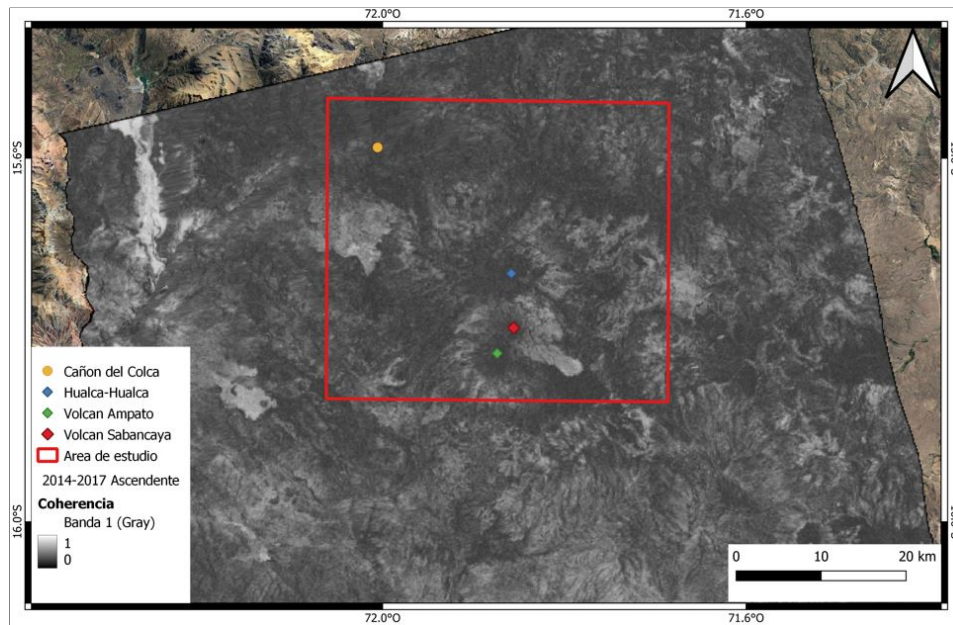


Figura 5.9: Mapa de coherencia interferométrica en pasada ascendente para las fechas: 08/10/2014 a 16/09/2017

En el caso de este intervalo temporal, se puede ver que la coherencia es mucho menor que en el caso anterior, esto se puede deber en mayor medida a la decorrelación temporal dentro de ese intervalo aproximado de tres años. Se puede ver que la colada de lava que nace desde el Sabancaya sigue siendo un área de alta coherencia (ver Figura 5.9).

Un factor que puede influir de manera importante es cambios físicos y químicos en el suelo debido a variaciones climáticas estacionales. En este caso, las fechas corresponden a estaciones muy parecidas, siendo el inicio octubre o noviembre, para la pasada ascendente y descendente respectivamente, y el final del intervalo es en Septiembre. Por lo tanto, al ser primavera y al ser una zona cordillerana muy árida, este factor no cobra tanta relevancia como lo podría ser en una zona con mayor vegetación y humedad, debido a que las concentraciones de lluvia más importantes se concentran desde diciembre a marzo.

■ Fase enrollada

En este caso es interesante ver que alrededor del norte del volcán Sabancaya se genera la variación de las franjas interferométricas concéntrica,

que es propio de patrones de inflación o deflación (ver Figura 5.10). Al tener coherencia más baja se puede ver la presencia de mayor ruido no coherente en el interferograma en toda la imagen. Por otro lado, también se ve la influencia de la topografía en el Cañón del Colca, generando franjas más juntas entre sí y también mayor presencia de ruido.

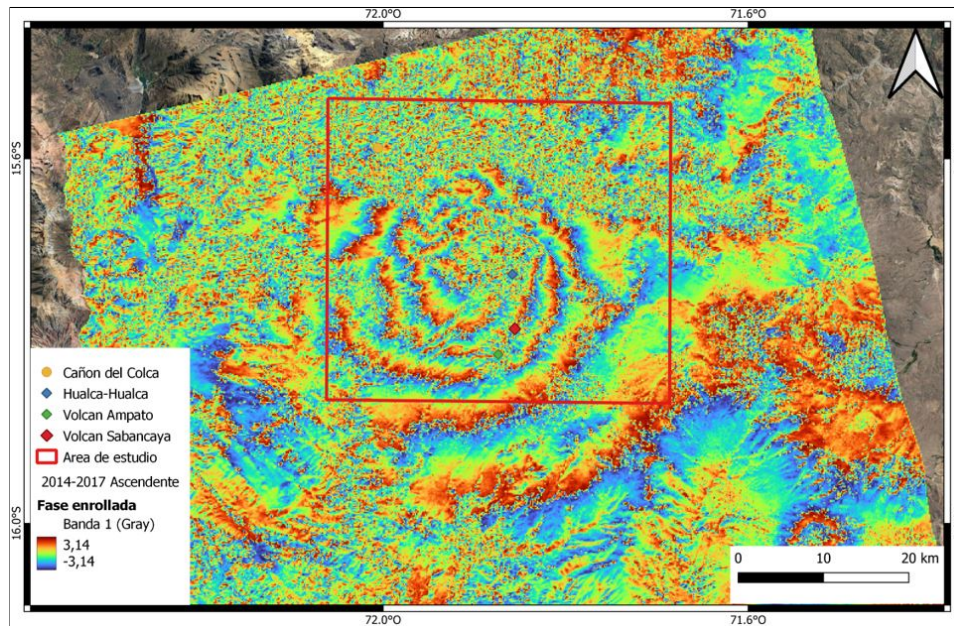


Figura 5.10: Mapa de fase enrollada en radianes en pasada ascendente para las fechas: 08/10/2014 a 16/09/2017

- Fase desenrollada** En este caso de fase desenrollada (ver Figura 5.11) se puede ver una abrupta disminución de la fase de aproximadamente -46° al norte del volcán Sabancaya. También se puede ver el efecto del cañón del Colca a lo largo de toda la parte norte de la zona de estudio.

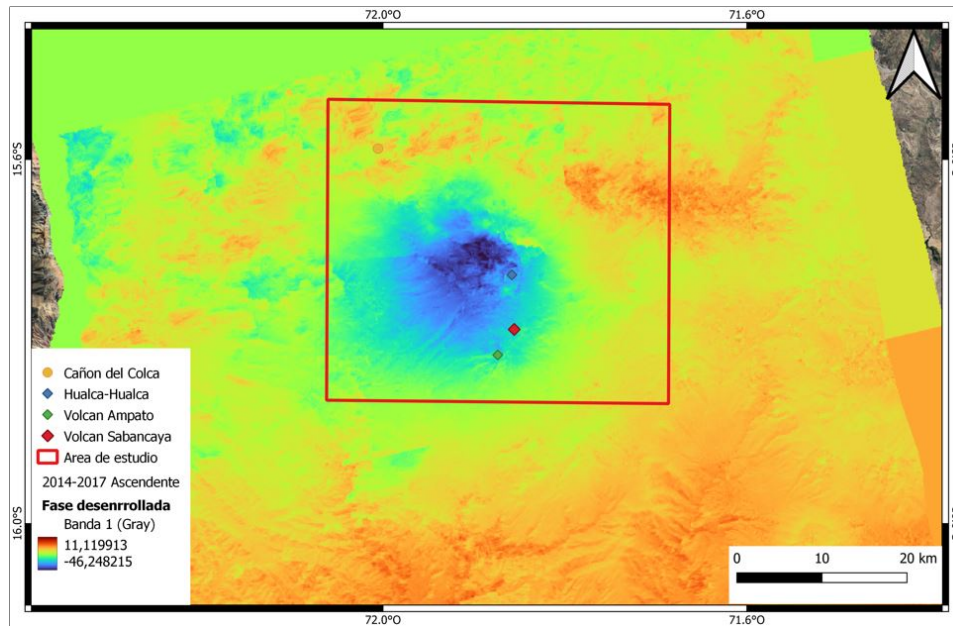


Figura 5.11: Mapa de fase desarrollada en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017

■ Desplazamiento en LOS

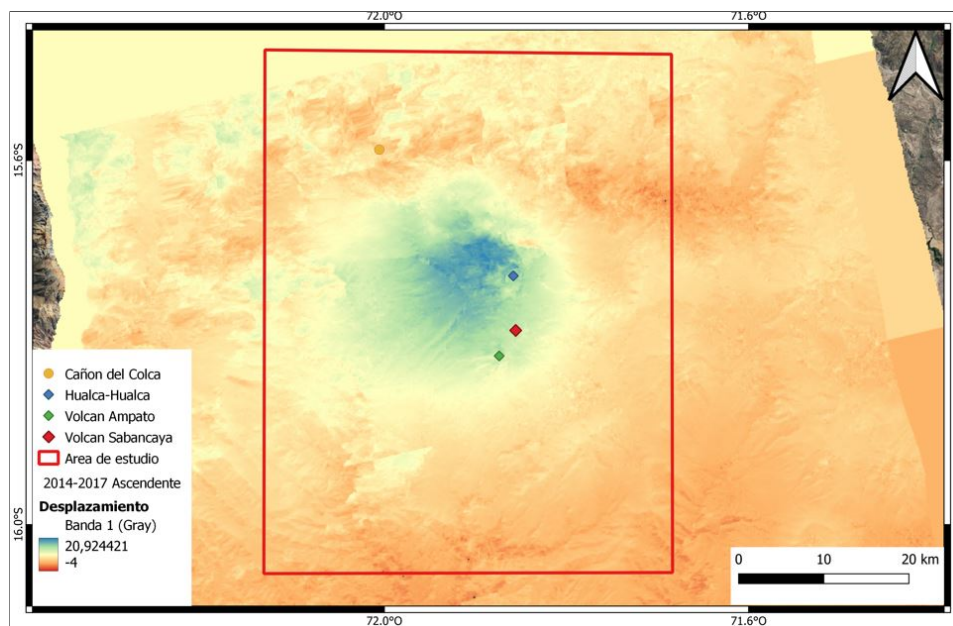


Figura 5.12: Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del Radar en pasada ascendente para las fechas:08/10/2014 a 16/09/2017

En este caso se puede ver un desplazamiento positivo mucho más alto que en el caso anterior al norte del volcán, llegando a valores cercanos a los 20 cm (ver Figura 5.12). Se puede ver nuevamente al norte del volcán Hualca-Hualca, un lineamiento que posee menor desplazamiento,

que en las imágenes anteriores también se manifiesta y en específico, en la Figura 5.10.

5.2.2. Pasada Descendente

■ Coherencia

En la Figura 5.13 se puede observar nuevamente muy baja coherencia interferométrica, en especial en el Cañón del Colca y en la cima de los volcanes pertenecientes al CVAS.

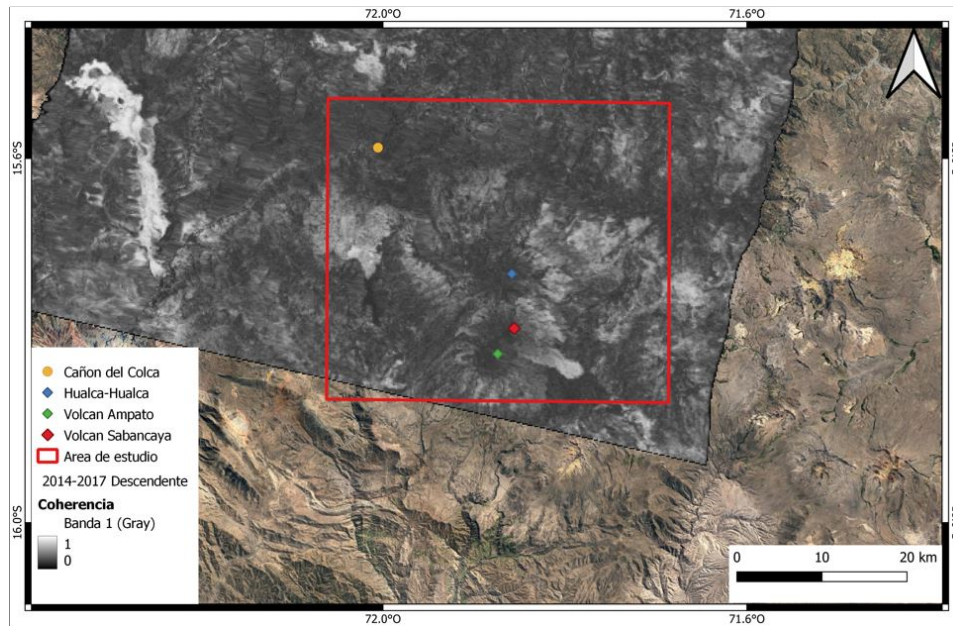


Figura 5.13: Mapa de coherencia interferométrica en pasada descendente para las fechas: 12/11/2014 a 15/09/2017

■ Fase enrollada

En este caso, se ven las franjas interferométricas concéntricas alrededor del volcán. Las imágenes nuevamente poseen mucho ruido, y se puede ver puntualmente al norte del volcán Hualca-Hualca, que el patrón de las franjas interferométricas cambia de dirección con un rumbo NW-SE, esto podría ser un indicio de una falla geológica. (ver Figura 5.15)

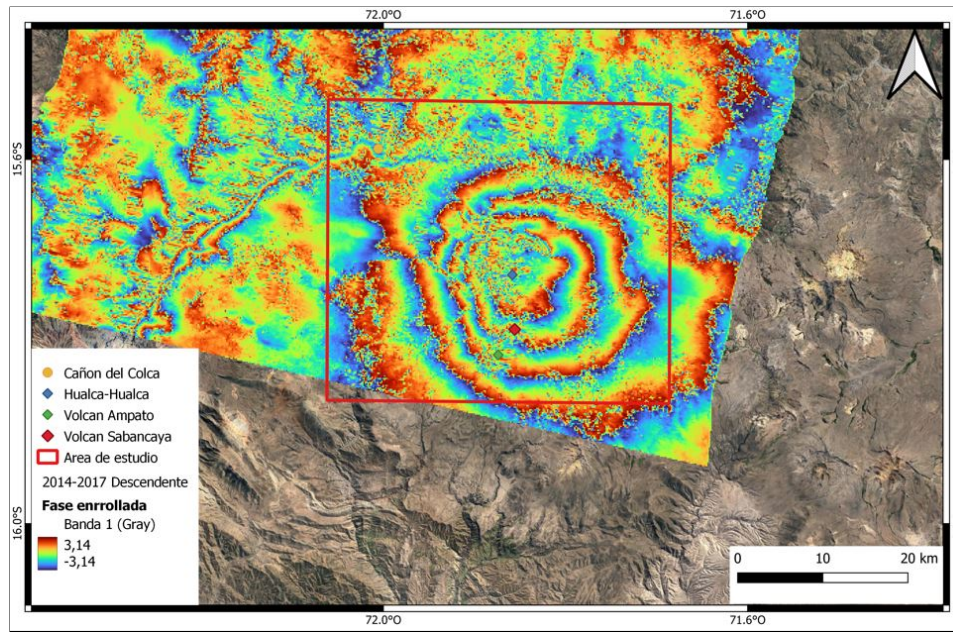


Figura 5.14: Mapa de fase enrollada en radianes en pasada descendente para las fechas: 12/11/2014 a 15/09/2017

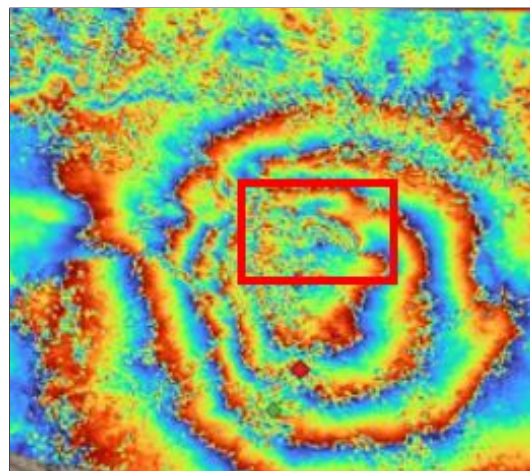


Figura 5.15: Imagen extraída de la Figura 5.14 donde el rectángulo rojo indica un posible rumbo de las franjas interferométricas al norte del volcán Hualca-Hualca

■ Fase desenrollada

Se puede observar en la pasada descendente la disminución de la fase desenrollada nuevamente al norte del CVAS (ver Figura 5.16). Se ve también el lineamiento mencionado anteriormente al norte del volcán Hualca-Hualca, que posee un valor mayor de fase que su entorno.

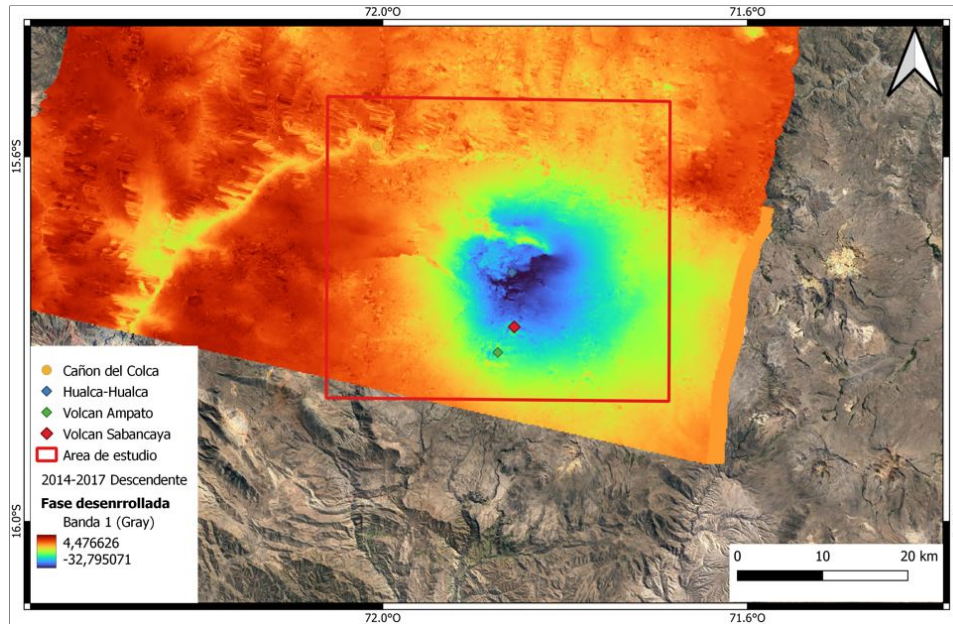


Figura 5.16: Mapa de fase desenrollada en pasada descendente para las fechas: 12/11/2014 a 15/09/2017

■ Desplazamiento en LOS

En este caso, para la pasada descendente, se ve un valor de desplazamiento en LOS que llega a valores cercanos a los 14.5 cm. Se puede apreciar nuevamente al norte del volcán Hualca-Hualca, un lineamiento que posee menor desplazamiento, que en las imágenes anteriores también se manifiesta (ver Figura 5.12).

5.3. Comparación 2017

La decorrelación temporal es un fenómeno que impacta mucho en la coherencia de las imágenes y en la presencia de ruido en los interferogramas posteriores. Es por esto, que se realizó una prueba para poder verificar en el caso del año 2017, que una mejora en la línea base temporal mejora significativamente el aspecto del interferograma enrollado en principio, pero también el de los productos siguientes. El análisis se realizó sobre una pasada descendente, y las imágenes seleccionadas fueron la correspondiente a D4 (ver Tabla 4.2) asociado a los días **15/09/2017 al 27/09/2017**.

En la Figura 5.18 se puede observar que la coherencia aumenta mucho más que en los casos anteriores, haciendo evidente la mejora con la disminución

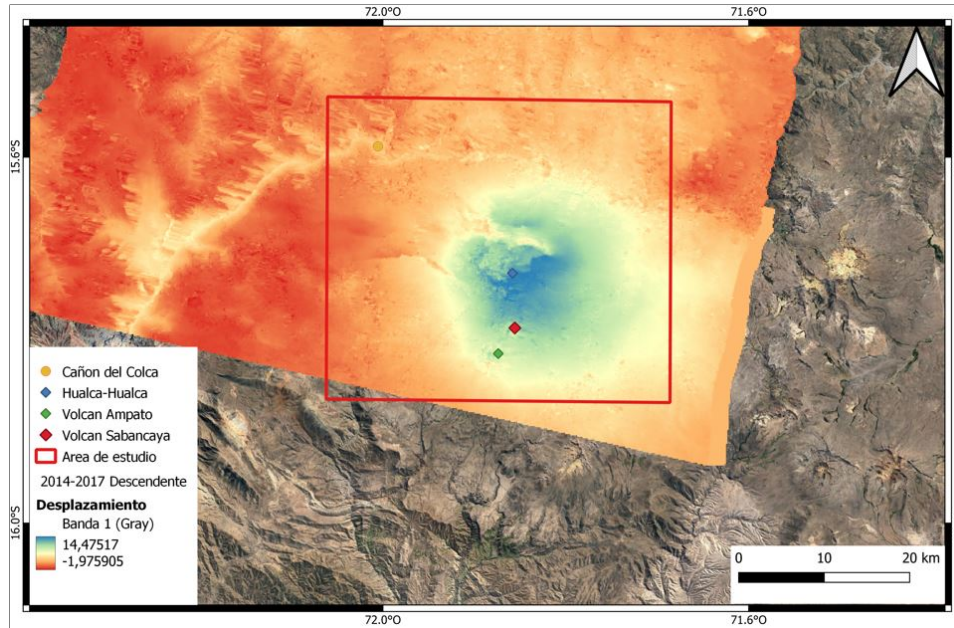


Figura 5.17: Mapa de desplazamiento (en cm) en la dirección de vista del Radar en pasada descendente

Pares (Master-Slave)	B_T (días)	B_{\perp} (metros)
D4- D5	12	11.03

Tabla 5.3: Pares de imágenes seleccionadas en 2017 en pasada descendente para ilustrar la mejora en los productos interferométricos con una disminución significativa de la línea base temporal B_T .

de B_T . Por otro lado, el interferograma de fase enrollado y desenrollado no muestran ruido como los casos anteriores, pero en este caso al ser una línea temporal tan corta, no llega a manifestarse cambios en la corteza como para ser visibles en estos productos por medio de las franjas interferométricas en el caso del interferograma enrollado. Finalmente, en el caso del desplazamiento, tampoco se ve desplazamiento en la zona del volcán, donde casi toda el área tiene un desplazamiento muy pequeño cercano a 0.

Con este producto entonces se puede ver que si bien es muy importante el intervalo temporal que se elija, también es importante conocer el sistema volcánico y comparar intervalos para tener una visión más clara de la deformación.

5.4. Falla 2021

La zona de estudio presenta múltiples sistemas de fallas que podrían interactuar con el sistema volcánico, por ejemplo, debido a que inflación o deflación del mismo puede reactivar fracturas previas. Es por esto que para el año 2021,

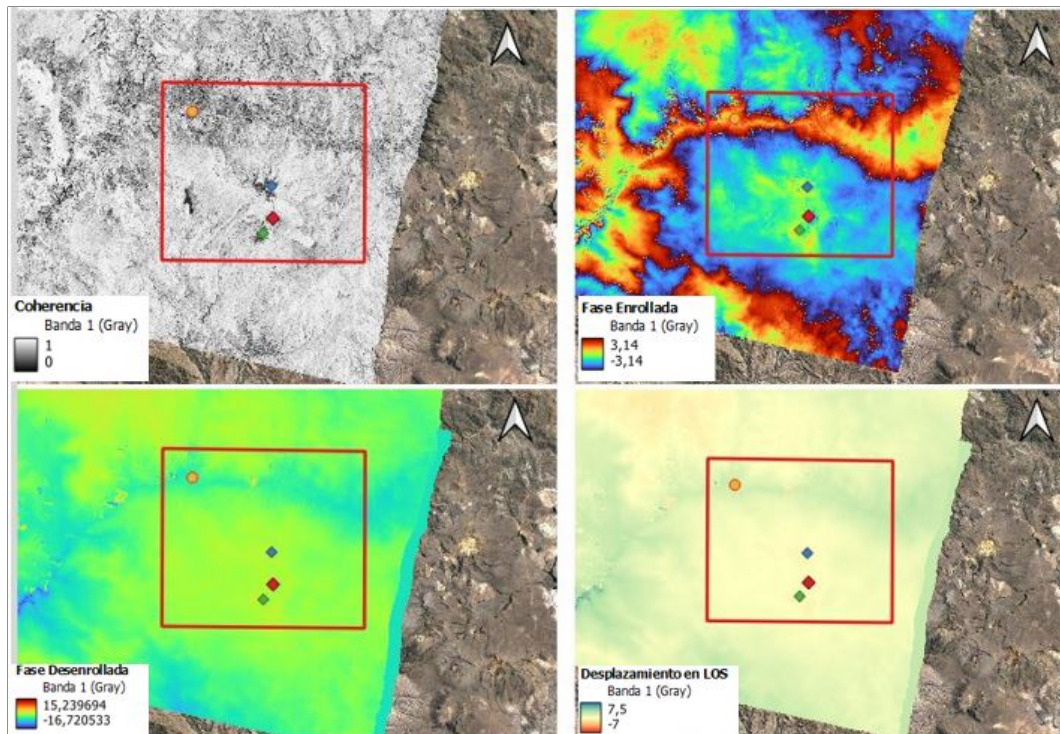


Figura 5.18: Productos del procesamiento del año 2017. **Arriba-Izquierda:** Mapa de coherencia interferométrica. **Arriba-Derecha:** Interferograma de fase enrollada en radianes. **Abajo-Izquierda:** Interferograma de fase desenrollada. **Abajo-Derecha:** Desplazamiento en la dirección de LOS.

donde se tenía dato de un sismo de magnitud 5.5 el día 8 de Octubre de ese año. Se analizó el posible desplazamiento debido a una falla. El intervalo de estudio que se analizó fue desde el 19/09/2021 al 13/10/2021 para el caso de la pasada ascendente, y desde el 18/09/2021 a 12/10/2021.

Pares (Master-Slave)	B_T (días)	B_{\perp} (metros)
A5- A6	24	10.18
D6 - D7	24	65.23

Tabla 5.4: Pares de imágenes seleccionadas en 2021.

5.4.1. Pasada Ascendente

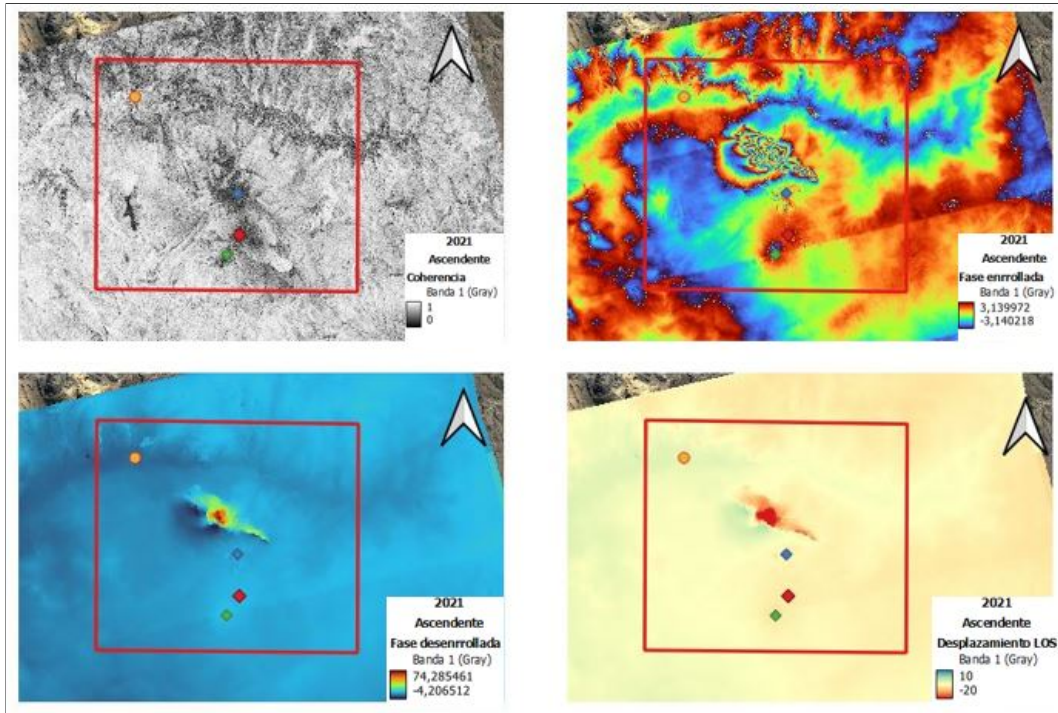


Figura 5.19: Productos del procesamiento del año 2021 Ascendente para las fechas 19/09/2021 al 13/10/2021. **Arriba-Izquierda:** Mapa de coherencia interferométrica. **Arriba-Derecha:** Interferograma de fase enrollada en radianes. **Abajo-Izquierda:** Interferograma de fase desenrollada. **Abajo-Derecha:** Desplazamiento en la dirección de LOS.

En este caso se puede ver que la coherencia de las imágenes son diferentes. Por un lado en el caso de la pasada ascendente, la coherencia a lo largo de la imagen (ver Figura 5.19 Arriba-Izquierda) es mejor en comparación a la pasada descendente (ver Figura 5.20 Arriba-Izquierda).

En ambas imágenes se puede ver claramente las franjas de fase en el interferograma enrollado, al norte del volcán Hualca-Hualca. Este tipo de patrones suele estar relacionado con patrones asociados a fracturas. En el caso del desenrollado de fase, para el caso de la pasada descendente se puede ver la presencia de ruido ubicado en las zonas de menor coherencia. Esto puede deberse a, como se mencionó anteriormente, que el algoritmo de desenrollado de fase utiliza los valores de coherencia para realizar el cálculo, por lo que en zonas de menor coherencia podría resultar en píxeles ruidosos. Finalmente, en el caso del desplazamiento en la dirección de LOS, se puede ver un desplazamiento de aproximadamente 20 cm negativo, lo que podría indicar un hundimiento.

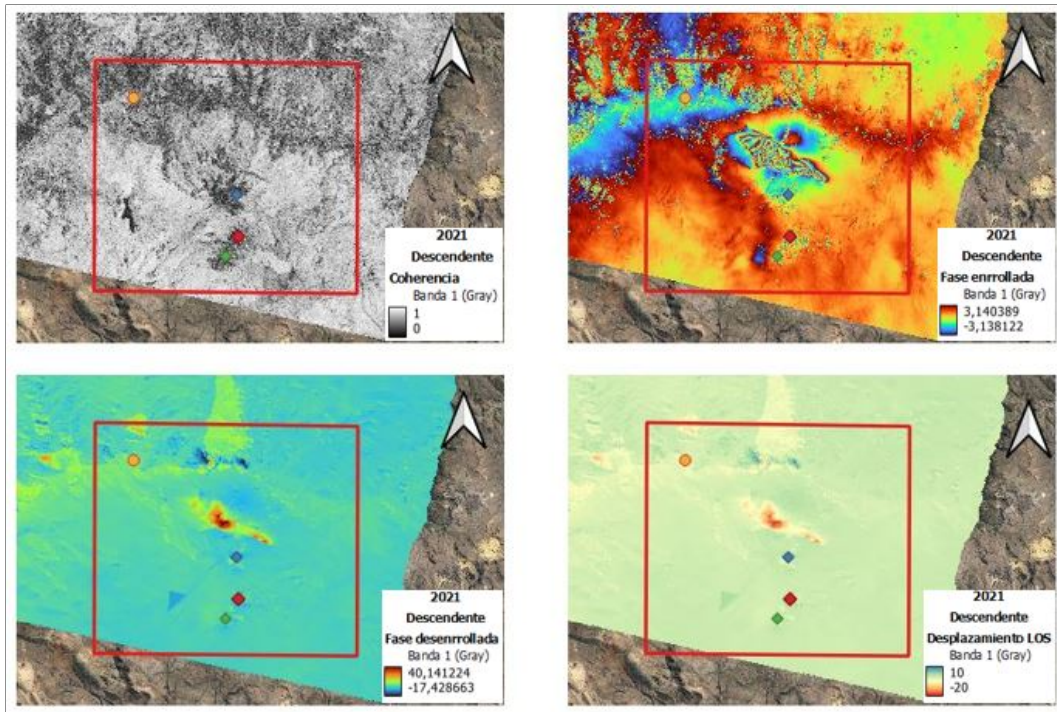


Figura 5.20: Productos del procesamiento del año 2021 Descendente para las fechas: 18/09/2021 a 12/10/2021. **Arriba-Izquierda:** Mapa de coherencia interferométrica. **Arriba-Derecha:** Interferograma de fase enrollada en radianes. **Abajo-Izquierda:** Interferograma de fase desenrollada. **Abajo-Derecha:** Desplazamiento en la dirección de LOS.

5.4.2. Pasada Descendente

5.5. Productos de desplazamiento finales

Se obtuvieron los desplazamientos descompuestos en Este-Oeste (E-W) y Verticales (Up-Down) para el caso del año 2016 y 2014 a 2017.

5.5.1. 2016

En este caso se puede ver que el desplazamiento vertical (Figura 5.21 Izquierda) coincide aproximadamente con el valor hallado en la Figura 5.4. En esta figura también se puede ver el efecto del Cañón del Colca. En la parte superior de la figura se puede distinguir un cambio abrupto que se repite en las dos figuras. Esto se debe al solapamiento entre las imágenes que se realiza al hacer la descomposición, y al ser pasadas distintas, puede generar distorsiones en regiones donde no coinciden. En el caso del desplazamiento en dirección E-W se puede ver que en la región del CVAS posee valores muy pequeños, cercanos a 0,5 cm o menores.

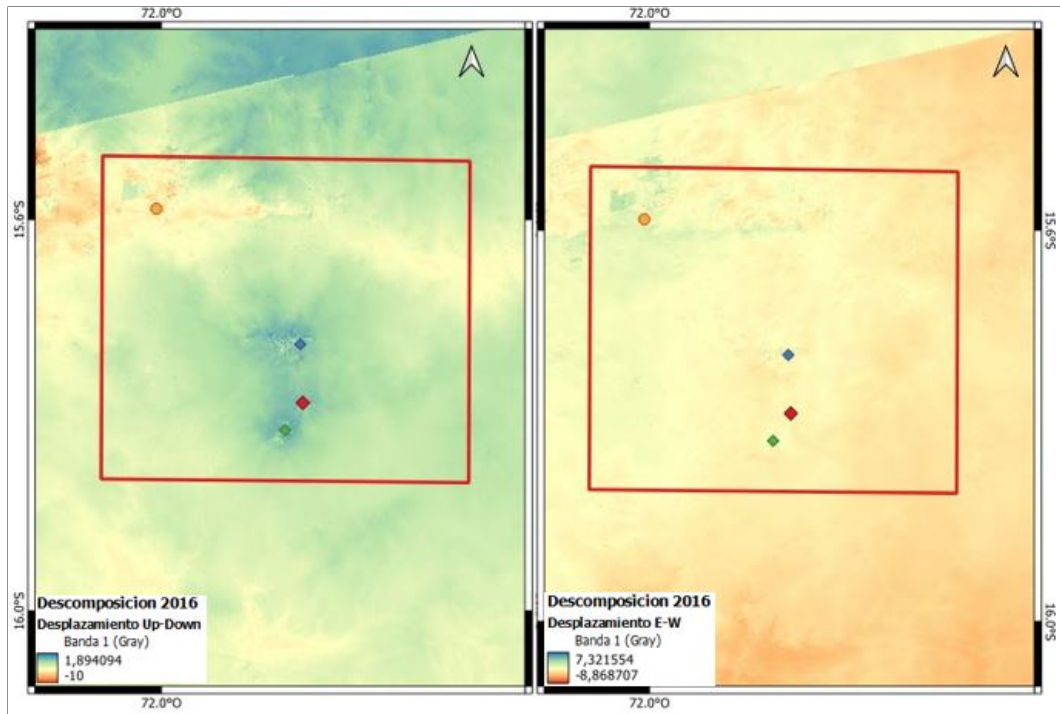


Figura 5.21: Descomposición del desplazamiento en Up-Down (Izquierda) y E-W (Derecha) para el año 2016.

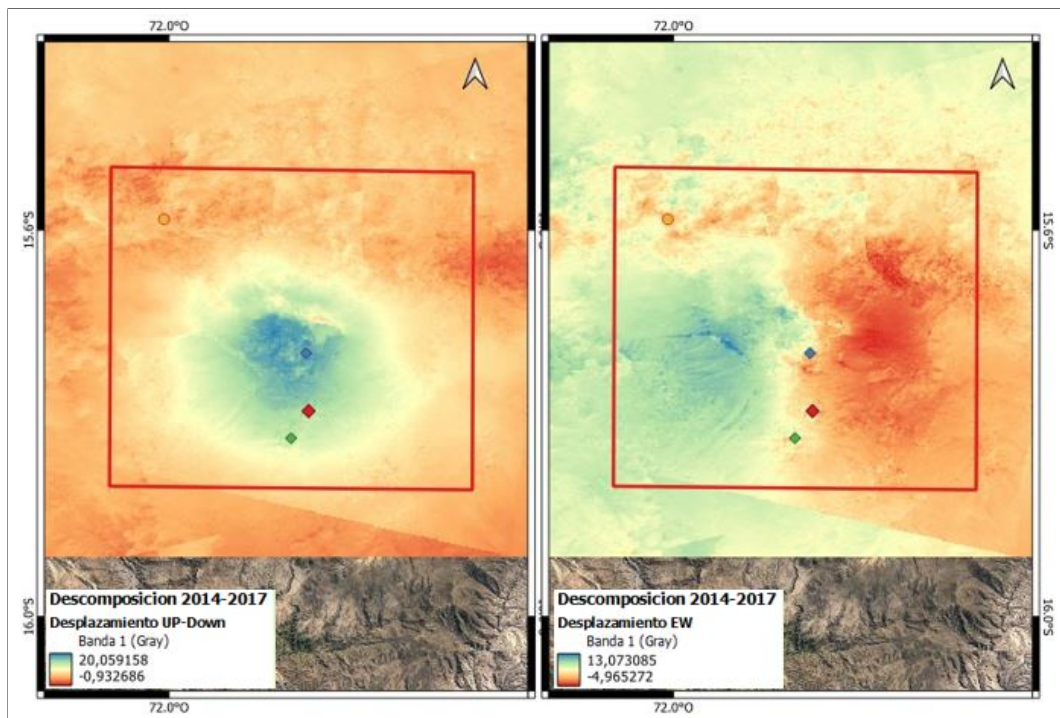


Figura 5.22: Descomposición del desplazamiento en Up-Down (Izquierda) y E-W (Derecha) para el intervalo 2014 a 2017.

5.5.2. 2014-2017

Para este intervalo se puede observar que el desplazamiento vertical (Up-Down) (ver Figura 5.22 Izquierda) es cercano a los 20 cm, lo cual coincide con el desplazamiento observado en LOS anteriormente, donde también se ve que el área de mayor desplazamiento se encuentra al norte del CVAS. Por otro lado, en el caso de la dirección E-W, se observa que cercanos al volcán Sabancaya y al resto de los volcanes el desplazamiento es casi nulo, pero al este se observa un desplazamiento negativo y al oeste un desplazamiento positivo.

5.5.3. Interpretación de resultados

En base a los resultados obtenidos se puede ver que el volcán Sabancaya en principio no es un sistema eruptivo violento que genere movimientos muy bruscos en el terreno. Se trata de un sistema dinámico de deformación continua y suave debido a su estado permanente de emisión de material. Entonces, los cambios que genera en el terreno a lo largo del tiempo son perceptibles con esta técnica si se estudia en intervalos más prolongados de tiempo. También es importante notar el efecto que genera la línea base temporal B_T en los productos interferométricos, por lo que se puede utilizar intervalos temporales más largos a costa de pérdida de coherencia por decorrelación temporal.

En el análisis del intervalo 2014 a 2017 se puede ver que el área de mayor deformación se encuentra al norte del CVAS, esto se podría deber a que la cámara magmática que alimenta al volcán Sabancaya se encuentre más al norte y que la apertura del Sabancaya sea la más adecuada para la emisión del material. Esta hipótesis coincide con el artículo escrito por Boixart et al. en el año 2020, quienes encontraron que, utilizando la técnica DInSAR mediante series temporales y GNSS, se podía establecer un modelo de cámara magmática profunda (10 a 12 km) ubicado 5 km al norte del volcán Sabancaya.

Por otra parte, este resultado también se observó en el Informe Técnico N°016-2023 realizado por el Instituto Geofísico de Perú. En este caso estudiaron la deformación del volcán utilizando series temporales desde 2014 hasta 2021 y hallaron que al norte del volcán Hualca-Hualca se encuentra un área de deformación positiva asociada con inflación registrada por medio de técnicas DInSAR y GNSS, con una velocidad de deformación que varía entre 3 mm/yr a 5 mm/yr.

En el caso de la posible falla encontrada en la Figura 5.14 y que se manifiesta a lo largo de las imágenes de desplazamiento, Macqueen et. al en el año 2020 concluyeron mediante un análisis desde el 2013 al 2019, con observaciones conjuntas de series temporales de deformación, datos térmicos, observación visual y datos de sismicidad, que las fallas cercanas al CVAS podrían ser desestabilizadas por la presión poral que generó el ascenso de magma. Por otro lado, para la deformación generada por una posible falla o conjunto de fallas, encontrada en el año 2021, se podría decir que este sistema corresponde al sistema de fallas Solarpampa (ver Figura 3.3), que corresponde a un sistema de fallas normales, por lo que lo que se podría estar viendo en la imagen es el descenso del bloque techo de la fractura. Si bien paralelo al sistema Solarpampa se encuentra el sistema de fallas activas Trigal, por cercanía a la zona de estudio, es más posible que sea el sistema Solarpampa. Por otro lado, en el Informe Técnico N°016-2023 se hace mención a un enjambre sísmico en esa zona que inició con un sismo de magnitud 5.5. El epicentro de ese sismo coincide con la zona de deformación hallada en los interferogramas.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se utilizó técnica interferométrica de imágenes de la misión Sentinel-1 aplicada en ambientes volcánicos por primera vez en la Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, destacándola como una herramienta muy útil a la hora de estudiar la deformación de grandes extensiones areales por fenómenos volcánicos y/o tectónicos. A su vez, si bien existen muchos softwares de procesamiento, el uso de SNAP marca un precedente debido a que no hay trabajos hasta la fecha con su uso en el CVAS. El acceso abierto tanto a un banco de imágenes que incluyen datos actualizados de alta resolución, como a un programa de cómputos específicos como lo es SNAP permitió una alta eficiencia a lo largo de todo el trabajo. La técnica utilizada permitió interpretar resultados con buena resolución a lo largo de toda el área de estudio, incluso en el área NW.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el intervalo de estudio, es decir, la línea base temporal, de las imágenes es un factor muy importante a la hora del procesamiento e interpretación, debido a que se pudo ver que a mayor B_T , mayor es la pérdida de coherencia a lo largo de todo el interferograma, lo que genera ruido no coherente en el producto desenrollado y en consecuencia las imágenes de el desplazamiento. Sin embargo, también es importante conocer en este caso, el sistema volcánico que se está estudiando. Para el caso del volcán Sabancaya, se vio que líneas temporales cortas ilustraban deformaciones mucho menores que intervalos mucho más largos. En el caso del intervalo de 2014 a 2017, se pudo observar inflación en un radio aproximado de 20 km con centro en el norte del volcán Hualca-Hualca, mientras que en el caso del año 2016 el desplazamiento se observó en la zona del CVAS.

Por otra parte, se pudo interpretar que la presencia de fallas normales del sistema Solarpampa, debido a su cercanía al CVAS, son las potenciales responsables de un hundimiento cercano a los 20 cm.

Los resultados de este trabajo muestran un importante acuerdo con la poca bibliografía que hay estudiando el área con la técnica DInSAR, tanto con informes técnicos [Perú, 2023] [del Perú, 2023], como artículos científicos [P et al., 2016] [MacQueen et al., 2020], todos de reciente publicación.

Una herramienta importante que se podría utilizar para validar los desplazamientos es GNSS cercanas al volcán para poder obtener valores de deforma-

ción in-situ.

6.1. Trabajos a futuro

Si bien en este caso se analizó un sistema volcánico en intervalos definidos para estudiar un evento puntual, se podría analizar en mayor detalle la tasa de deformación mediante la generación de series temporales. Esta técnica consiste en la utilización de muchas imágenes consecutivas a lo largo del tiempo que se van procesando con una imagen de referencia. Esto permite medir la velocidad de deformación, aumentando la precisión del análisis en un sistema volcánico y minimizando errores propios de la técnica.

Por otro lado, la precisión de la técnica permite estudiar otros fenómenos naturales, como la glaciología. La técnica va a permitir ver el desplazamiento de los glaciares, su velocidad y desplazamiento, así como también posibles avances y retrocesos.

Otra utilidad es la posible deformación generada a partir de la extracción de hidrocarburos que ya que la precisión actual permite medir cambios que pueden ser indicativos de procesos subsuperficiales como la compactación del yacimiento, la subsidencia y el levantamiento inducido por la inyección de fluidos.

Es importante mencionar otras misiones satelitales que se podrían utilizar para realizar estudios de interferometría, como SAOCOM-1 en la banda L. Satélite Argentino de Observación Con Microondas (SAOCOM) es un proyecto de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina. Esta misión utiliza también la tecnología SAR y beneficia no solo a Argentina sino a la comunidad científica global. Una particularidad de SAOCOM es que mejora los errores inducidos por decorrelación temporal, con la desventaja de que la disponibilidad de imágenes es mayor de latitudes medias a altas.

Bibliografía

- [Amin et al., 2021] Amin, G., Shahzad, M., Jaweria, S., and Zia, I. (2021). Measuring land deformation in a mega city karachi-pakistan with sentinel sar interferometry. *Geocarto International*.
- [Bischoff et al., 2020] Bischoff, C., Ferretti, A., Novali, F., Uttinia, A., Gianico, C., and Meloni, F. (2020). Nationwide deformation monitoring with squeeSAR[®] using sentinel-1 data. *Tenth International Symposium on Land Subsidence (TISOLS)*.
- [Boixart et al., 2020] Boixart, G., Cruz, L., Cruz, R., Eullades, L., and Battaglia, M. (2020). Source model for sabancaya volcano constrained by dinsar and gnss surface deformation observation. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*.
- [Calvet, 2022] Calvet, A. (2022). Interferometría diferencial sar para detectar deformación cortical por actividad sísmica. Master's thesis, Universidad Nacional de La Plata.
- [Chaussard et al., 2014] Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., and Amelung, F. (2014). Land subsidence in central mexico detected by alos insar time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140:94–106.
- [Chen and Zebker, 2002] Chen, C. W. and Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large sar interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, 40:1709–1719.
- [Curlander and McDonough, 1991] Curlander, J. C. and McDonough, R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley-Interscience.
- [del Perú, 2023] del Perú, I. G. (2023). Deformación en el entorno del volcán sabancaya y caracterización de la fuente a partir del modelado con datos gnss y dinsar del período 2014-2021. *Informe Técnico N^o 016-2023*.
- [Franceschetti and Lanari, 1999] Franceschetti, G. and Lanari, R. (1999). *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press.
- [Goldstein and Wegner, 1998] Goldstein, R. and Wegner, C. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25:4035–4038.

- [Goldstein et al., 1988] Goldstein, R. M., Zebker, H. A., and Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23:713–720.
- [Gómez Martin, 2021] Gómez Martin, M. (2021). Interferometría de imágenes radar de apertura sintética aplicada a la deformación superficial del terreno: región de bío bío, chile. Master’s thesis, Universidad de Salamanca.
- [Hanssen, 2001] Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry*. Kluger Academic Publishers.
- [Hermosilla, 2016] Hermosilla, E. D. (2016). Interferometría a radar de apertura sintética (insar) aplicada al estudio del movimiento de ladera adena al volcán calbuco con ayuda de imágenes sentinel 1a. Master’s thesis, Universidad Técnica Federico Santa María.
- [Joughin et al., 2010] Joughin, I., Smith, B. E., and Howat, I. M. (2010). A complete map of greenland ice velocity derived from satellite data collected over 20 years. *Journal of Glaciology*, 56:415–430.
- [Lu and Dzurisin, 2014] Lu, Z. and Dzurisin, D. (2014). Insar imaging of aleutian volcanoes: Monitoring a volcanic arc from space. *Springer*.
- [MacQueen et al., 2020] MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K., Pritchard, M., Bagnardi, M., and Milillo, P. (2020). Volcano-tectonic interactions at sabancaya volcano, peru: Eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125:166–182.
- [Massonnet and Feigl, 1998] Massonnet, D. and Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface. *Reviews of Geophysics*, 36:441–500.
- [Mering et al., 1996] Mering, C., Huamán, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B., and Guillaude, R. (1996). New data on the geodynamics of southern peru from computerized analysis of spot and sar ers-1 images. *Tectonophysics*, 259:153–169.
- [Oliver et al., 2003] Oliver, C., Quegan, S., and Wooster, M. J. (2003). Understanding synthetic aperture radar images. *The Institution of Electrical Engineers*.
- [P et al., 2016] P, S., M, R., Mariño, J., and H., G. (2016). The eruptive chronology of the ampato-sabancaya volcanic complex (southern peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323:110–128.
- [Perú, 2023] Perú, I. (2023). Características de la erupción del volcán sabancaya. período enero 2022 - enero 2023. *Informe Técnico N° A7362*.

- [Poland and Zebker, 2022] Poland, M. and Zebker, H. (2022). Volcano geodesy using insar in 2020: the past and next decades. *Bull Volcanol*, 84:27.
- [Richards, 2009] Richards, J. A. A. (2009). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Springer.
- [Rosell, 2022] Rosell, P. (2022). Desarrollo de un modelo de corrección de la influencia del vapor de agua troposférico en el procesamiento dinsar con el aporte de gnss y era5. *Universidad Nacional de Cuyo*.
- [Rott et al., 2009] Rott, H., Nagler, T., Siegel, A., and Grasemann, B. (2009). The contribution of interferometric sar to the assessment of landslide hazards. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2009)*, 2:988–991.
- [Skolnik, 2001] Skolnik, M. I. (2001). *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill Education.
- [Stern, 2002] Stern, R. J. (2002). Subduction zones. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 40:3–38.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Plataforma Sentinel-1

Lifetime	7 years (consumables for 12 years)
Orbit	Near-polar Sun-synchronous orbit at 693 km altitude; 12-day repeat cycle; 175 orbits per cycle
Mean local solar time	18:00 at ascending node
Orbital period	98.6 min
Maximum eclipse duration	19 min
Attitude stabilisation	3-axis stabilised
Attitude accuracy	0.01° (each axis)
Instrument	Right looking with respect to the flight direction
Steering	Zero Doppler yaw steering and roll steering (-0.8° to +0.8°)
Attitude profile	Geocentric and geodetic
Orbit knowledge	10 m (each axis, 3 σ) using GPS
Operative autonomy	96 h
Launch mass	2300 kg (including 130 kg mono-propellant fuel)
Dimensions (stowed)	3900 × 2600 × 2500 mm
Solar array average power	5900 W (end-of-life)
Battery capacity	324 Ah
Satellite availability	0.998
S-band TT&C data rates	64 kbit/s telecommand; 128 kbit/s – 2 Mbit/s telemetry (programmable)
X-band downlink data rate	2 × 260 Mbit/s
Launcher	Soyuz from Kourou

Figura 7.1: Información de la plataforma Sentinel-1